



**UNIL** | Université de Lausanne

Unicentre

CH-1015 Lausanne

<http://serval.unil.ch>

---

*Year : 2014*

Synthèse de l'évolution de la plateforme Urgonienne  
(Barrémien tardif à Aptien précoce) du Sud-Est de la France :  
Facies, micropaléontologie, géochimie, géométries,  
paléotectonique et géomodélisation.

Bastide Fanny

Bastide Fanny, 2014, Synthèse de l'évolution de la plateforme Urgonienne (Barrémien tardif à Aptien précoce) du Sud-Est de la France : Facies, micropaléontologie, géochimie, géométries, paléotectonique et géomodélisation.

Originally published at : Thesis, University of Lausanne

Posted at the University of Lausanne Open Archive <http://serval.unil.ch>

Document URN : urn:nbn:ch:serval-BIB\_15CFA375163B5

### **Droits d'auteur**

L'Université de Lausanne attire expressément l'attention des utilisateurs sur le fait que tous les documents publiés dans l'Archive SERVAL sont protégés par le droit d'auteur, conformément à la loi fédérale sur le droit d'auteur et les droits voisins (LDA). A ce titre, il est indispensable d'obtenir le consentement préalable de l'auteur et/ou de l'éditeur avant toute utilisation d'une oeuvre ou d'une partie d'une oeuvre ne relevant pas d'une utilisation à des fins personnelles au sens de la LDA (art. 19, al. 1 lettre a). A défaut, tout contrevenant s'expose aux sanctions prévues par cette loi. Nous déclinons toute responsabilité en la matière.

### **Copyright**

The University of Lausanne expressly draws the attention of users to the fact that all documents published in the SERVAL Archive are protected by copyright in accordance with federal law on copyright and similar rights (LDA). Accordingly it is indispensable to obtain prior consent from the author and/or publisher before any use of a work or part of a work for purposes other than personal use within the meaning of LDA (art. 19, para. 1 letter a). Failure to do so will expose offenders to the sanctions laid down by this law. We accept no liability in this respect.

**Synthèse de l'évolution de la plateforme Urgonienne (Barrémien tardif  
à Aptien précoce) du Sud-Est de la France : Facies, micropaléontologie,  
géochimie, géométries, paléotectonique et géomodélisation.**

**THÈSE DE DOCTORAT**

Présentée à la Faculté des géosciences et de l'environnement de l'Université de Lausanne  
et à la Faculté des sciences de Grenoble par :

**Fanny Bastide**

pour obtenir le grade de Docteur à l'Université de Lausanne et de Grenoble.

Composition du Jury (huis clos) :

<b>Pr. Eric Verrecchia</b>	Université de Lausanne	Président du Jury
<b>Pr. Karl Föllmi</b>	Université de Lausanne	Directeur de thèse
<b>Dr Thierry Dumont</b>	Université de Grenoble	Directeur de thèse
<b>Dr. Gérard Massonnat</b>	TOTAL S.A.	Expert externe
<b>Pr. Guillaume Caumon</b>	École Nationale Supérieure de Géologie	Expert externe
<b>Dr. Thierry Adatte</b>	Université de Lausanne	Expert interne
<b>Dr. Annie Arnaud</b>	Association Dolomieu	Experte externe



## IMPRIMATUR

Vu le rapport présenté par le jury d'examen, composé de

Président du colloque :	M. le Professeur Eric Verrecchia
Co-directeur de thèse :	M. le Professeur Thierry Dumont (Grenoble)
Co-directeur de thèse :	M. le Professeur Karl Föllmi (UNIL)
Expert interne :	M. le Docteur Thierry Adate
Expert externe :	Mme le Docteur Annie Arnaud-Vanneau
Expert externe :	M. le Docteur Guillaume Caumon
Expert externe :	M. le Docteur Gérard Massonnat

Le Doyen de la Faculté des géosciences et de l'environnement autorise l'impression de la thèse de

**Madame Fanny BASTIDE**

*Titulaire d'un Master en géosciences  
Université Joseph Fourier, Grenoble, France*

Thèse effectuée dans le cadre d'une co-tutelle entre  
l'Université Joseph Fourier de Grenoble (UJF) et l'Université de Lausanne (UNIL)  
intitulée

**SYNTHESE DE L'EVOLUTION DE LA PLATEFORME URGONIENNE  
(BARREMIEN TARDIF A APTIEN PRECOCE) DU SUD-EST DE LA  
FRANCE : FACIES, MICROPALÉONTOLOGIE, GEOCHIMIE,  
GEOMETRIES, PALEOTECTONIQUE ET GEOMODELISATION**

Lausanne, le 26 mai 2014

Faculté des géosciences et de l'environnement



Professeur Eric Verrecchia, Vice-doyen

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

**préparée dans le cadre d'une cotutelle entre  
l'Université de Grenoble et l'Université de Lausanne**

Spécialité : **Sciences de la Terre et de l'Univers et de  
l'Environnement**

Arrêté ministériel : le 6 janvier 2005 - 7 août 2006

Présentée par

**Fanny Bastide**

Thèse dirigée par **Thierry Dumont**, codirigée par **Karl Föllmi**

préparée au sein des **Laboratoires ISTERre (Institut des Sciences de  
la Terre) et ISTE (Institut des Sciences de la Terre)**

dans les **Écoles Doctorales TUE (Terre, Univers, Environnement) de  
l'Université de Grenoble et Géosciences et Environnement de  
l'Université de Lausanne.**

**Synthèse de l'évolution de la plateforme urgonienne  
(Barrémien tardif à Aptien précoce) du Sud-Est de la France :  
Facies, micropaléontologie, géochimie, géométries,  
paléotectonique et géomodélisation.**

Thèse soutenue publiquement le **18 avril 2014**  
devant le jury composé de :

**M., Guillaume, CAUMON**

Professeur à l'Ecole National supérieur de Géologie de Nancy, Rapporteur

**M., Adrian, IMMENHAUSER**

Professeur à l'Université de Bochum, Rapporteur

**M. Thierry, DUMONT**

Chargé de recherche à l'Université de Grenoble, Directeur de thèse

**M., Karl, FÖLLMI**

Professeur à l'Université de Lausanne, Directeur de thèse

**M., Thierry, ADATTE**

Expert scientifique en géochimie à l'Université de Lausanne, Co-directeur de thèse

**M., Gérard, MASSONNAT**

Expert international en géomodélisation, TOTAL S.A., Tuteur de thèse

**M., Philippe, RAZIN**

Professeur à l'Université de Bordeaux, Examinateur

**M., Philippe, LEONIDE**

Maître de conférence au Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences  
de l'Environnement, Examinateur





*Choisir, c'est renoncer.*

André Gide,  
(entre *autre*)

## **REMERCIEMENTS :**

Je remercie en premier lieu Gérard Massonnat, mon tuteur au sein de l'entreprise TOTAL, qui m'a proposé ce magnifique sujet de thèse me permettant de découvrir les somptueux paysages du Sud-Est de la France qu'il apprécie tant. Merci de m'avoir fait confiance, de m'avoir conseillée, remuée quand c'était nécessaire et accompagnée tout au long de cette thèse. Son accomplissement n'aurait pas été possible sans l'engagement de mes directeurs de thèse. Je tiens donc à remercier Thierry Dumont, Karl Föllmi et Thierry Adatte, principalement pour leur aide scientifique, mais aussi administrative et matérielle ainsi que pour leur soutien et leur sympathie. Merci également à Annie et Hubert Arnaud pour m'avoir suivie et aidée à appréhender l'Urgonien ainsi que le monde microscopique qu'il contient.

Je tiens également à exprimer mes remerciements aux membres du jury de mes deux soutenances. Merci à Eric Verrechia, Guillaume Caumon, Adrian Immenhauser, Philippe Razin ainsi que Philippe Léonide, pour avoir pris le temps de lire mon mémoire de thèse et de commenter mon travail.

Merci aux deux laboratoires qui m'ont accueillie : le Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines de Grenoble et l'Institut de Géologie et de Paléontologie de Lausanne, ainsi que le personnel associé. Je remercie particulièrement Jorge Spangenberg pour son aide à analyser les isotopes stables, Alexis Godet à qui je souhaite le meilleur, ainsi qu'Alicia Fantasia. Je souhaite également exprimer mes meilleurs sentiments à Stéphane Guillot, responsable de l'équipe Tectonique Reliefs et Bassins, ainsi qu'à Jean Braun, directeur de l'école doctorale de Grenoble pour leurs conseils et leurs soutiens.

Une thèse ne pourrait aboutir sans l'aide du personnel technique et administratif. Je pense tout particulièrement à Myriam Franceries, Odile Estreboou, Christine Bigot et Anne-Marie Chagros pour m'avoir aidée sur toute la logistique et le côté administratif de ma thèse me permettant de me focaliser sur mon travail scientifique. Merci également à Thierry Kinderstuth et Jean-Claude Espada pour la préparation des échantillons et cuttings et l'élaboration des lames minces. Merci à Rémi et Julien, les guides de montagne qui m'ont permis d'aller chercher des échantillons dans des endroits inaccessibles. Merci à tous pour vos compétences et pour votre sympathie. Je n'oublie pas non plus Jean-Marc François et toute la société BergaSud pour toutes les données de forages transmises. Merci également à Pierre Torelli de la société Safège.

Un grand merci à Eric Descamps, Delphine Duchamp et David Pitaval, précurseurs du projet Urgonien, pour leurs encouragements, et leurs conseils.

Je remercie aussi les stagiaires qui ont participé à ce projet de thèse, et particulièrement Senda Saddoud et Lucie Dal Soglio qui m'ont apportée une aide précieuse.

Et que serait une thèse sans l'accompagnement, dans les bureaux, mais aussi et surtout en dehors, de ses collègues ? Un merci particulier et amical à Mélissa Refauvelet pour sa présence, son soutien de tous les jours et pour les portefeuilles, téléphones, portables, pulls, sacs, ..., cherchant à prendre leurs indépendances ; à David Malet pour sa bonne humeur, sa bonhomie et son amitié ; à Xavier Segura, pour son recul et nos instants partagés ; à Caroline Planteblat, co-bureau enthousiaste et partenaire de « thèse triangulaire », pour nos discussions scientifiques et autres, pour son énergie, sa volonté débordante et sa sympathie naturelle. Merci également à toute l'équipe Ajilon devenu Euro Engineering pour la bonne ambiance de travail qu'elle génère.

Merci à vous les copains et copines, avec qui j'ai passé de supers week-ends qui permettent de repartir du bon pied. Merci à Jo (le copain qui traverse les années), merci à Marco (le seul, le vrai), Terrien (confident c. !), Jean, Jordan, Sarah, Aurélia (mange-z !), Fred, Barbara, Coin-coin, Danvert, Toutoun, Vauzelle, Lanac, Fernanda, Jean, Gaël et Alexandre (Merci pour les nombreux pastis !) Sandra, Monnerie... merci à tous pour votre amitié.

Merci aux colocs : David (ca fait deux fois !), Laure (on aura bien rigolé quand même), Cha (merci pour les papillons, je les ai bien reçus ;), Flo (Mr tranquille), Sandra (pour ta joie de vivre et ta capacité à la transmettre).

Un grand merci à toute ma famille de m'avoir entourée malgré le manque de temps accordé. Merci à mon frère Julien, ma soeur Audrey, mes tantes Naty et Mado, mes oncles Fredo et Daniel et à mes grands-mères, Mémé et particulièrement Mamie qui a su m'encourager dans les moments difficiles.

*«Oh regarde le beau pli là !»* (Papa, 1999...).

*«Ca va bien se passer, tu verras.»* (Maman, chaque fois que nécessaire).

Je remercie sincèrement mes parents, Bernard et Maribel Bastide, qui m'ont donné l'envie et les moyens d'étudier la géologie. Merci de me soutenir, de me rassurer et de m'encourager depuis 28 ans. Sans votre éducation, rien de tout cela n'aurait été possible.

Je réserve ces dernières lignes pour d'abord remercier la providence qui a invité Sébastien à rentrer dans ma maison, puis la foudre d'y avoir lancé un de ces plus beaux coups ! Merci Seb d'avoir été présent, patient (mais si !), pour l'équilibre que tu as su m'apporter, pour ton enthousiasme, nos sentiments partagés et ton affection.

J'estime ton aide immense, merci encore Seb.



## RÉSUMÉ :

Il y a environ 125 millions d'années, au Crétacé inférieur, la position des continents et le climat terrestre étaient bien différents de ce que l'on connaît aujourd'hui. Le Sud-Est de la France, secteur de cette étude, était alors recouvert d'eau, sous un climat chaud et humide. Sur la bordure de cette étendue d'eau (appelée bassin Vocontien), qui correspond aujourd'hui aux régions de la Provence, du Vaucluse, du Gard, de l'Ardèche et du Vercors, des plateformes carbonatées, (telles que les Bahamas), se développaient. Le calcaire, formé à partir des sédiments accumulés sur ces plateformes, est appelé Urgonien.

L'objectif de cette étude est de définir les facteurs qui ont influencé le développement de cette plateforme carbonatée dite « urgonienne » et dans quelle mesure.

Plusieurs missions de terrain ont permis de récolter de nombreux échantillons de roche en 52 lieux répartis sur l'ensemble du Sud-Est de la France. Les observations réalisées sur le terrain ainsi que les données acquises en laboratoire (microfaune, microfacies et données géochimiques) ont permis, de subdiviser chacune des 52 séries urgoniennes en séquences stratigraphiques et cortèges sédimentaires. La comparaison des épaisseurs et des faciès de chaque cortège sédimentaire permet de concevoir la géométrie et l'évolution paléogéographique de la plateforme urgonienne.

Les résultats de cette étude démontrent que son organisation est principalement dirigée par des failles qui ont jouées pendant le dépôt des sédiments. Sur la bordure nord du bassin Vocontien, trois failles subméridiennes contrôlent la géométrie et la répartition des environnements de dépôt. Sur sa bordure sud, ces failles syn-sédimentaires d'orientation N30° et N110° délimitent des blocs basculés. En tête de bloc, des séries d'épaisseurs réduites à faciès de lagon interne se sont déposées alors que les pieds de blocs sont caractérisés par des épaisseurs importantes et la présence de faciès plus externes.

Ces concepts ont ensuite été testés en construisant un modèle numérique en trois dimensions de l'Urgonien du Sud-Est de la France. Sa cohérence avec les données acquises tout au long de cette étude d'une part, et sa cohérence géométrique d'autre part, valide les théories avancées.

Des formations équivalentes à l'Urgonien sont réparties dans le monde entier et notamment au Moyen-Orient où elles constituent les réservoirs pétroliers les plus importants. Être capable de caractériser les facteurs ayant influencé son architecture permet par la suite une meilleure exploitation de ses ressources énergétiques.



**Synthèse de l'évolution de la plateforme Urgonienne (Barremien tardif à Aptien précocé) du Sud-Est de la France : Facies, micropaléontologie, géochimie, géométries, paléotectonique et géomodélisation.**

Thèse de doctorat présentée par Fanny Bastide à l'Institut des Sciences de la Terre de la faculté des Géosciences et de l'Environnement de l'Université de Lausanne, et à l'Institut des Sciences de la Terre de la faculté des Sciences de l'Université de Grenoble.

**Résumé :**

Au Crétacé inférieur, l'intense activité magmatique due à la dislocation du super-continent Pangée influence fortement les conditions environnementales globales. Au Barrémien terminal et Aptien basal, période géologique dont fait l'objet cette étude, le bassin Vocontien, puis Bédoulien, recouvre le Sud-Est de la France, sous un climat chaud et humide. Sur les bordures de ces bassins, des plateformes carbonatées se mettent en place. Les sédiments qui se déposent sur ces plateformes sont à l'origine de la formation urgonienne.

Afin d'étudier cette formation, une charte biostratigraphique, principalement basée sur les Orbitolinidés, et un modèle de faciès ont été développés. Les assemblages faunistiques, la succession des faciès, les observations de terrain ainsi que l'étude de signaux géochimiques ont permis le découpage séquentiel de la série urgonienne le long de 54 coupes et puis, répartis sur l'ensemble du Sud-Est de la France.

Les corrélations induites par cette étude stratigraphique ont mis en évidence d'importantes variations d'épaisseur et d'environnements de dépôt au sein même de la plateforme urgonienne. Ces variations sont expliquées par le jeu de failles syn-sédimentaires qui ont compartimentées la plateforme urgonienne en blocs. Sur la bordure sud du bassin Vocontien, ces failles d'orientation N30° et N110° délimitent six blocs basculés. Au sommet du Barrémien terminal, la subsidence des blocs situés le plus au sud s'amplifie jusqu'à provoquer l'ouverture du bassin de la Bédoule au sud du secteur d'étude.

Cette théorie d'évolution a ensuite été testée par l'élaboration d'un modèle numérique en trois dimensions de l'Urgonien du Sud-Est de la France. Sa cohérence avec les données acquises tout au long de cette étude d'une part, et sa cohérence géométrique d'autre part, valide les théories avancées.

Des analogues de l'Urgonien sont répartis dans le monde entier et notamment au Moyen-Orient où ils représentent d'importants réservoirs pétroliers. Être capable de caractériser les facteurs ayant influencé l'architecture de l'Urgonien du Sud-Est de la France permet par la suite une meilleure exploitation de ses ressources énergétiques.

**Synthesis of the evolution of the Urgonian platform (late Barremian to early Aptian)  
in southeastern France: facies, micropaleontology, geochemistry,  
paleotectonics and numerical model.**

Doctoral thesis presented by Fanny Bastide at the «Institut des Sciences de la Terre» of the “faculté des Géosciences et de l’Environnement” of the University of Lausanne, and at the «Institut des Sciences de la Terre» of the “faculté des Sciences” of the University of Grenoble.

**Abstract :**

During the Early Cretaceous epoch, intensive magmatic activity due to the dislocation of the super-continent Pangaea, highly influenced global environmental conditions, which were characterized by a warm and generally humid climate. In this context, carbonate platforms were important in tropical and subtropical shallow-water regions, and especially during the late Barremian and early Aptian, platform carbonates of so-called Urgonian affinity are widespread. In southeastern France, the Urgonian platform was part of the northern Tethyan margin and bordered the Vocontian and the Bedoulian basins.

The goal of this thesis was the systematic study of the Urgonian Formation in this region, and in order to achieve this goal, a biostratigraphic chart and a facies model were developed. The faunistic assemblages, the facies succession, the field observations and the study of geochemical signals lead to a sequential subdivision of the Urgonian series along 54 sections and wells allocated in five different regions in southeastern France (Gard, Ardèche, Vercors, Vaucluse and Provence).

Correlations from this stratigraphic study highlight important variations in thickness and depositional environments of the Urgonian series. These variations are explained by relative movements induced by syn-sedimentary faults, which divided the Urgonian platforms into blocks. On the southern border of the Vocontian basin, these faults, oriented N30° and N110°, delineate six tilted blocks. At the top of the upper Barremian carbonates, subsidence of the two southern blocks accelerated leading to the opening of the Bedoulian basin.

The reconstruction of the sequence-stratigraphic and paleoenvironmental evolution of the Urgonian platforms was then tested by the construction of a 3D numerical model of the Urgonian formation of southeastern France. Firstly, its consistency with the data collected during this study, and secondly, its geometrical coherence validate the proposed theory.

Urgonian analogs exist all over the world and particularly in Middle East where they constitute important oil reservoirs. The exact reconstruction of the major factors, which influenced the architecture of these formations, will allow for a better exploitation of these energy resources.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>Chapitre 1: L'Urgonien, Généralités .....</b>	<b>27</b>
1 LE CRÉTACÉ INFÉRIEUR .....	28
2 HISTORIQUE ET DÉFINITION .....	30
3 CONTEXTE GÉOLOGIQUE .....	32
4 LES PROBLÉMATIQUES.....	35
5 LES OBJECTIFS .....	37
6 APPROCHE ET MÉTHODES UTILISÉES .....	39
<b>Chapitre 2 : Les études précédentes .....</b>	<b>41</b>
1 LE VAUCLUSE .....	42
2 LA MOYENNE PROVENCE .....	47
3 LA BASSE PROVENCE .....	51
4 LE VERCORS .....	55
5 L'ARDÈCHE .....	61
6 LE GARD.....	64
<b>Chapitre 3 : Les nouveaux outils et éléments de corrélation.....</b>	<b>71</b>
1 INTRODUCTION .....	74
2 GEOLOGICAL SETTING .....	75
3 METHODS AND TOOLS .....	77
3.1 SAMPLING .....	77

3•2	SEQUENCE STRATIGRAPHY INTERPRETATION.....	77
3•3	MICROFACIES MODEL : DEFINITION .....	78
3•4	BIOSTRATIGRAPHY.....	83
3•5	STABLE-CARBON ISOTOPE AND PHOSPHORUS ANALYSES.....	83
4	RESULTS .....	85
5	INTERPRETATIONS .....	91
5•1	SEQUENCE STRATIGRAPHIC INTERPRETATION: THE EVOLUTION OF STRATIGRAPHIC SEQUENCES IN SPACE AND TIME.....	91
5•2	BIOSTRATIGRAPHY BASED ON BENTHIC FORAMINIFERA.....	92
5•3	SEQUENCE STRATIGRAPHY, CARBON-ISOTOPE AND PHOSPHORUS CONTENTS IN THE SIX DEDICATED SECTIONS .....	95
5•3•1	The Nan section (Vercors).....	95
5•3•2	The Gorges de l'Ardèche section (Ardèche).....	95
5•3•3	The Pont de Laval (Ardèche) .....	95
5•3•4	The Angostrines (Gard) .....	95
5•3•5	The Fontaine section (Vaucluse) .....	96
5•3•6	The Candelle section (Provence) .....	96
6	DISCUSSION .....	97
6•1	VALIDITY OF THE $\delta^{13}\text{C}$ RECORDS .....	97
6•2	CORRELATION OF THE $\delta^{13}\text{C}$ RECORDS .....	98
6•3	PHOSPHORUS RECORDS.....	99
7	CONCLUSIONS .....	103
	References .....	104
	Annexes :.....	108
	<b>Chapitre 4 : Données, interprétations et implications.....</b>	<b>111</b>
1	LE GARD .....	115

1•1	LES DONNÉES .....	115
1•2	INTERPRÉTATIONS.....	117
2	L'ARDÈCHE.....	120
2•1	LES DONNÉES.....	120
2•2	INTERPRÉTATIONS .....	125
3	VERCORS.....	130
3•1	LES DONNÉES .....	130
3•2	INTERPRÉTATIONS .....	131
4	VAUCLUSE.....	138
4•1	LES DONNÉES.....	138
4•2	INTERPRÉTATIONS .....	142
5	PROVENCE .....	146
5•1	LES DONNÉES.....	146
5•2	INTERPRÉTATIONS .....	148
6	ORGANISATION GÉNÉRALE DES SÉQUENCES URGONIENNES.....	154
7	PALÉOGÉOGRAPHIE GÉNÉRALE ET RÉSEAUX DE FAILLES .....	156
8	SYNTHÈSE DES DONNÉES ET INTERPRÉTATIONS.....	161
8•1	LES CARTES D'ÉPAISSEURS.....	162
8•2	LES CARTES D'ÉROSION .....	164
8•3	LES CARTES DE PALÉOPROFONDEUR D'EAU .....	165
<b>Chapitre 5 : Mise en cohérence, Modélisation 3D .....</b>		<b>167</b>
<b>Introduction : .....</b>		<b>168</b>
1	LA MÉTHODOLOGIE GOSTRAT.....	169
1•1	PRINCIPE .....	169

1.2	MÉTHODE .....	169
2	LE MODÈLE DE L'URGONIEN DU SUD-EST DE LA FRANCE. ....	172
2.1	LES GRILLES STRUCTURALES ET STRATIGRAPHIQUES .....	172
2.1.1	Cadre géographique .....	172
2.1.2	Les données puits .....	172
2.1.3	Le réseau de fractures et délimitation des blocs.....	174
2.1.4	Des cartes d'épaisseurs aux surfaces stratigraphiques .....	176
2.1.5	Création de la grille structurale .....	178
2.2	LES MODÈLES EN FACIÈS DE DÉPÔT .....	181
2.2.1	1D : du faciès à la paléoprofondeur d'eau.....	181
2.2.2	Multi-1D : De la paléoprofondeur d'eau à l'accommodation.....	182
2.2.3	3D : Extrapolation de l'accommodation.....	183
2.2.4	De l'accommodation à la paléoprofondeur d'eau .....	188
2.2.5	De la paléoprofondeur d'eau au faciès .....	190
2.2.6	Application de l'érosion.....	195
3	DISCUSSION.....	202
3.1	GÉOMÉTRIE DE LA SÉRIE URGONIENNE .....	203
3.1.1	Organisation séquentielle .....	203
3.1.2	Géométrie interne.....	208
3.2	DISTRIBUTION DES FACIÈS.....	210
3.3	ÉTUDE DES RÉSIDUS.....	235
3.4	PISTES D'AMÉLIORATION DU MODÈLE .....	237
	Conclusion .....	239
	Lexiques .....	242
 <b>Chapitre 6 : La paléotectonique du Crétacé inférieur et son influence sur l'Urgonien.....</b>		<b>245</b>
1	CONTEXTE GÉODYNAMIQUE GÉNÉRAL .....	246
2	LA ROTATION DE LA PLAQUE IBÉRIQUE.....	248

3	LES CONSÉQUENCES CONNUES DE LA GÉODYNAMIQUE CRÉTACÉE.....	251
4	INFLUENCE POSSIBLE SUR LA GÉOMÉTRIE URGONIENNE .....	253
	Conclusion .....	255
<b>Chapitre 7 : Synthèse et conclusions.....</b>		<b>257</b>
1	OBJECTIFS .....	258
2	MÉTHODE .....	259
3	INTERPRÉTATIONS .....	260
4	L'ÉVOLUTION DE LA PLATEFORME URGONIENNE.....	261
4•1	LA SÉQUENCE BA3.....	261
4•2	LA SÉQUENCE BA4 .....	261
4•3	LA SÉQUENCE BA5 .....	262
4•4	LA SÉQUENCE A1.....	262
5	LES FACTEURS RESPONSABLES DE L'ORGANISATION DE LA PLATEFORME URGO- NIENNE .....	264
5•1	LE GARD .....	264
5•2	LA CAMARGUE ET LE SUD DE LA PROVENCE .....	264
5•3	LES ALPILLES, LE LUBERON ET LE NORD DE LA PROVENCE .....	265
5•4	LA BORDURE SUD DU BASSIN VOCONTIEN (ARDÈCHE ET VAUCLUSE) .....	266
5•5	LE VERCORS .....	267
6	CONCLUSIONS .....	268
7	PERSPECTIVES .....	274
	Références .....	277



**Annexes.....I**

<b>1</b>	<b>LES LOGS STRATIGRAPHIQUES .....</b>	<b>IX</b>
<b>2</b>	<b>LES CARTES D'ÉPAISSEUR, D'ÉROSION ET DE PALÉO-PROFONDEUR D'EAU ...</b>	<b>LXXXIII</b>
<b>3</b>	<b>RÉSUMÉS POUR DES PARTICIPATIONS AUX CONGRÈS.....</b>	<b>CXII</b>
3•1	GFC - 5ÈME RÉUNION THÉMATIQUE – PARIS 2009.....	CXII
3•2	FORAMS 2010, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FORAMINIFERA, BONN, GERMANY.....	CXIV
3•3	IAS 2011, METTING OF SEDIMENTOLOGISTS, ZARAGOZA, SPAIN .....	CXVI
3•4	GEO 2012, THE 10 <sup>TH</sup> MIDDLE-EAST GEOSCIENCES CONFERENCE, MANAMA, BAHREIN .....	CXVIII
3•5	SWISSSED, 20 <sup>TH</sup> MEETING, FRIBOURG, SUISSE .....	CXIX
3•6	EGU 2012, GENERAL ASSEMBLY, VIENNA, AUSTRIA .....	CXXII
3•7	ADIPEC 2012, ABU DHABI, UNITED ARABIAN EMIRATES.....	CXXIV
3•8	IAS 2012, METTING OF SEDIMENTOLOGISTS, SCHLADMING, AUSTRIA ...	CXXXIX





# LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Calcaire Urgonien à rudistes, carrière des Conquettes à gauche, La Baume à droite, Gard. ....	31
Figure 1-2 : Evolution de la paléogéographie mondiale du Permien à l'Aptien (Stampfli <i>et al.</i> , 2004). ....	34
Figure 1-3 : Carte de répartition des faciès carbonatés à la fin du Barrémien supérieur dans le Sud de la France et le Nord de l'Espagne. (Arnaud-Vanneau <i>et al.</i> 1979) .....	35
Figure 1-4 Correspondance entre les séries du Moyen-Orient et l'Urgonien du Sud-Est de la France. ....	38
Figure 2-1 : Carte de la région du Vaucluse et localisation des principales séries étudiées.....	46
Figure 2-2 : Carte de la Moyenne Provence et localisation des principales coupes étudiées .....	50
Figure 2-3 : Carte de la basse Provence, et localisation des principales coupes étudiées. ....	54
Figure 2-4 : Stratigraphie séquentielle de l'Urgonien du Vercos, répartition stratigraphique des « calcaires de Glandasse » et des « calcaires urgoniens » (Arnaud <i>et al.</i> , 1998) .....	59
Figure 2-5 : Répartition stratigraphique des Orbitolinidés dans les chaînes subalpines septentrionales (Arnaud <i>et al.</i> , 1998) .....	60
Figure 2-6 : Carte de la région ardéchoise au Barrémien terminal, Cotillon <i>et al.</i> , 1979 .....	63
Figure 2-7 : Corrélation de coupes et puits du Gard, le long d'un transect nord-nord-est - sud-sud-ouest (trait rouge sur la carte). Les traits gris (sur la carte) et les rectangles gris représentent les failles délimitant les blocs basculés. ....	66
Figure 2-8 : Carte représentant la localisation des points de données et leurs interprétations hydrogéologiques dans le secteur du Gard (modifié depuis Descamps, 2009).....	67
Figure 2-9 : Calendrier tectonique du secteur du Gard (modifié depuis Descamps, 2009).....	68
Figure 2-10 : Modèle structural en blocs basculés renseigné en environnement de dépôt du secteur du Gard (cf. carte de la Figure 2-7, p. 66) (Descamps <i>et al.</i> , 2009) .....	69

Figure 3-1 : Paleogeographical context of the Vocontian basin, late Barremian .....	75
Figure 3-2 : Geological map of southeastern France, location of sectors and sections.....	76
Figure 3-3 : Correspondence between facies types and environments on a carbonate platform (Legend in Annexe 1) .....	78
Figure 3-4 : Microfacies and microfacies association model.....	79
Figure 3-5 : Illustrations of the microfacies defined in the microfacies model created for this study. ....	82
Figure 3-6 : Facies, sequence-stratigraphic subdivision, $\delta^{13}\text{C}$ values and phosphorus concentration in the Nan section (Legend in Annex 1). For the colours facies legend, refer to the Figure 3-4, p. 79.....	85
Figure 3-7 : Facies, sequence-stratigraphic subdivision, $\delta^{13}\text{C}$ values and phosphorus concentration in the Gorges de l'Ardèche section (Legend in Annex 1). For the colours facies legend, refer to the Figure 3-4, p. 79 .....	86
Figure 3-8 : Facies, sequence-stratigraphic subdivision, $\delta^{13}\text{C}$ values and phosphorus concentration in the Pont de Laval section (Legend in Annex 1). For the colours facies legend, refer to the Figure 3-4, p. 79 .....	87
Figure 3-9 : Facies, sequence-stratigraphic subdivision, $\delta^{13}\text{C}$ values and phosphorus concentration in the Angostrines section (Legend in Annex 1). For the colours facies legend, refer to the Figure 3-4, p. 79.....	88
Figure 3-10 : Facies, sequence-stratigraphic subdivision, $\delta^{13}\text{C}$ values and phosphorus concentration in the Fontaine section (Legend in Annex 1). For the colours facies legend, refer to the Figure 3-4, p. 79 89 .....	89
Figure 3-11 : Facies, sequence-stratigraphic subdivision, $\delta^{13}\text{C}$ values and phosphorus concentration in the Candelle section (Legend in Annex 1). For the colours facies legend, refer to the Figure 3-4, p. 79 90. ....	90
Figure 3-12 : Biostratigraphic chart mainly based on orbitolinid assemblages. Black lines : this study ; gray lines : biostratigraphic distribution from Arnaud <i>et al.</i> , 1998. Ammonite biozonation is based on Vermeulen (2006) for the Barremian, and on Reboulet <i>et al.</i> (2011) for the Aptian. ....	94
Figure 3-13 : Correlation of the $\delta^{13}\text{C}$ signals of the different sections. The thicknesses of the sections are respected and at a same scale.....	100
Figure 3-14 : Correlation of the $\delta^{13}\text{C}$ signals of the different sections against time.	

Reference curves from Föllmi, 2012: gray curve after Sprovieri et al. (2006); black curve after Emmanuel and Renard (1993), Hennig <i>et al.</i> (1999), Van de Schootbrugge <i>et al.</i> (2000), Herrle <i>et al.</i> (2004), Godet <i>et al.</i> (2006) and Föllmi <i>et al.</i> (2006). .....	101
Figure 3-15 : Comparison of the Phosphorus concentration signals of the different sections.	102
Figure 4-1 : Carte de localisation des différents secteurs situés sur le pourtour du bassin Vocontien, dans le Sud-Est de la France.....	112
Figure 4-2 : Carte de localisation des coupes et puits dans le secteur du Gard.....	115
Figure 4-3 Panorama de la coupe des Angostrines, les traits oranges représentent les deux falaises levées en rappel, les traits jaunes, le reste de la coupe levée au sol. Sur les images notées A et B, les flèches rouges indiquent la position de poches karstiques, le trait rouge, la limite de séquence Ba3 et les traits noirs, les limites de bancs sous et sus-jacents. Sur l'image notée C, la flèche rouge indique la position de la limite de séquence Ba5.....	117
Figure 4-4 : Corrélation de plusieurs coupes et puits du secteur du Gard. Les rectangles gris représentent les failles d'orientation N110° délimitant les blocs basculés. ....	118
Figure 4-5 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien du Gard. Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés. Les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles .....	119
Figure 4-6 : Carte de localisation des coupes et puits dans le secteur de l'Ardèche.....	120
Figure 4-7 : Représentation des coupes levées en rappel le long des falaises des Gorges de l'Ardèche. Le schéma illustre l'organisation des bancs la localisation des coupes ainsi que la position des surfaces d'inondation maximum (Mfs) des quatre séquences composant l'Urgonien. ....	122
Figure 4-8 : Log de la coupe composite des Gorges de l'Ardèche.....	123
Figure 4-9 : Photographie du panorama de Chames pris depuis le Serre de Tourre. Les traits noirs représentent les limites des corps carbonatés bioclastiques. Le «zig-zag» orange représente le passage des faciès bioclastiques fins aux faciès hémipélagiques. ....	125
Figure 4-10 : Corrélations des coupes du Nord du Gard et de l'Ardèche. ....	127
Figure 4-11 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien du Gard et de l'Ardèche.	

Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés, les flèches bleues, la subsidence induite par le jeu des failles, la zone rouge représente la zone de haut-fond et le bassin Vocontien est représenté en bleu clair. Le point d'interrogation illustre l'incertitude sur sa géométrie dans ce secteur. ....	129
Figure 4-12 : Carte de localisation des données du secteur du Vercors. ....	131
Figure 4-13 : Photo et schéma explicatif d'un affleurement urgonien dans lequel une faille, scellée dans les calcaires urgoniens, est datée du même âge. (d'après H., Arnaud, 2012, communication personnelle). ....	132
Figure 4-14 : Carte de localisation des séries d'épaisseur réduites (d'après A., Arnaud, 2012, communication personnelle). ....	133
Figure 4-15 : Localisation des hauts-fonds le long des failles de Presles-Saillant-Condorcet et de Rencurel (Arnaud, 2005). ....	134
Figure 4-16 : Corrélation de coupes du Vercors le long d'un transect nord-nord-est - sud-sud-ouest. ....	135
Figure 4-17 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien du secteur du Vercors. Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés, les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles, la zone rouge représente la zone de hauts-fonds et le bassin vocontien est représenté en bleu clair. P-S-C est l'abréviation de Presle-Saillant-Condorcet. ....	137
Figure 4-18 : Carte de localisation des coupes et puits du secteur du Vaucluse. ....	138
Figure 4-19 : localisation du puits d'Orgon, symbolisé par une croix dans un cercle noir, et de la coupe étudiée par J.P. Masse, représentée par un trait noir, sur la carte géologique de la région d'Orgon. ....	140
Figure 4-20 : Log stratigraphique de la coupe d'Orgon (Masse, 1976). ....	141
Figure 4-21 : Corrélations des coupes et puits du secteur du Vaucluse. ....	143
Figure 4-22 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien des secteurs du Gard, de l'Ardèche et du Vaucluse. Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés, les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles et les zones rouges représentent les zones de haut-fond. ....	145
Figure 4-23 : Carte de Localisation des coupes étudiées dans le secteur de la Provence. ....	146

Figure 4-24 : Photographie du Massif du Puget depuis la mer sur laquelle on peut observer le pendage des couches vers l'est.....	147
Figure 4-25 : Corrélation des quatre coupes du secteur de la Provence.....	149
Figure 4-26 : Carte paléogéographique des secteurs Vaucluse et Provence d'après Masse, 1976. ....	150
Figure 4-27 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien des secteurs de la Provence et du Vaucluse au Barrémien supérieur. Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés, les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles et les zones rouges représentent les zones de haut-fond.....	152
Figure 4-28 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien des secteurs de la Provence et du Vaucluse à l'Aptien inférieur, sur les bordures des bassins Vocontien et Sud-Provençal. Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés, les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles et les zones rouges représentent les zones de haut-fond. ....	153
Figure 4-29 : Profil de la plateforme urgonienne. Les cortèges de bas niveau sont représentés en jaune, les cortèges transgressifs, en vert, et les cortèges de haut niveau, en orange. ....	155
Figure 4-30 : Paléogéographie du Sud-Est de la France et du Nord de l'Espagne au Barrémien supérieur, d'après Arnaud-Vanneau et al., 1979.....	156
Figure 4-31 : Paléogéographie du Sud-Est de la France et du Nord de l'Espagne à la base de l'Aptien, d'après Arnaud-Vanneau et al., 1979. ....	156
Figure 4-32 : Carte synthétique de la paléogéographie du Sud-Est de la France au Barrémien supérieur. Les traits rouges représentent les failles qui délimitent les blocs dans lesquels les sédiments urgoniens se sont déposés. Les zones rouges localisent les zones de haut-fond. Les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles. P-S-C est l'abréviation de Presle-Saillant-Condorcet. ....	158
Figure 4-33 Carte synthétique de la paléogéographie du Sud-Est de la France à la base de l'Aptien. Les traits rouges représentent les failles qui délimitent les blocs dans lesquels les sédiments urgoniens se sont déposés. Les zones rouges localisent les zones de haut-fond. Les flèches bleues illustrent	



la subsidence induite par le jeu des failles. P-S-C est l'abréviation de Presle-Saillant-Condorcet. ....	159
Figure 4-34 : Carte de localisation des différents blocs qui subdivisent le Sud-Est de la France.....	160
Figure 5-1 : Schéma récapitulatif de la méthodologie gOstrat. ....	171
Figure 5-2 : Exemple de restauration du puits de Blanquau. A gauche le puits tel qu'observé aujourd'hui, à droite le puits restauré des épaisseurs de séries érodées représentées par des flèches noires.....	173
Figure 5-3 : Carte du Sud-Est de la France. Les points rouges marquent les puits et coupes sélectionnées pour la modélisation. Les traits rouges marquent le tracé des failles dessinées dans gOcad, les noms des différents blocs sont notés en violet. ....	175
Figure 5-4 : Cartes d'épaisseurs de chaque cortège sédimentaire. L'échelle comprend des valeurs de 0 à 200 mètres, respectivement du blanc au orange foncé. ....	177
Figure 5-5 : Représentation des trois options de géométrie des couches numériques entre deux surfaces stratigraphiques.....	179
Figure 5-6 : Grille structurale de l'Urgonien du Sud-Est de la France. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent au cortège de bas niveau, celles coloriées en vert au cortège transgressif et celles coloriées en orange au cortège de haut niveau. L'exagération verticale est de facteur 15.....	180
Figure 5-7 : Exemple d'une courbe de paléoprofondeur d'eau (courbe rouge) créée pour la coupe des Angostrines (Gard). Les traits rouges horizontaux représentent les surfaces stratigraphiques, les rectangles représentent la distribution de l'association de faciès déterminée aux puits et la cou- leur verte représente la tranche de profondeur d'eau dans laquelle la probabilité d'apparition de ce faciès est maximale. Une fois ces courbes créées, elles ont été réintégrées sous forme de « log » dans les objets « puits » correspondants. ....	181
Figure 5-8 : Représentation des corrélations des différents puits dans l'espace réel (en haut) et dans l'espace paramétrique temps (en bas). Les courbes rouges représentent les limites de séquences, les vertes les surfaces transgres- sives et les bleues les surfaces d'inondation maximum. A gauche est représenté le référentiel paramétrique sur lequel le nombre de couches	

numériques attribuées par cortège est défini. Les autres puits sont placés par ordre alphabétique. ....	183
Figure 5-9 : Grille de moyenne d'accommodation, par layer, des quatre séquences. L'échelle des valeurs s'étend de 0 à 15 mètres. Les valeurs les plus importantes ont les couleurs les plus foncées. ....	186
Figure 5-10 : Illustration des étapes permettant la présence d'une valeur d'accommodation dans la majorité des cellules de la grille.....	187
FIGURE 5-11 : Cartes de paléoprofondeur d'eau à différentes périodes. L'échelle va de 0 mètre, représenté par la couleur blanche à -40 mètres représenté par le bleu le plus foncé. ....	189
Figure 5-12 : Distribution des associations de faciès en fonction de la paléoprofondeur d'eau. La courbe grise représente la distribution de l'association de faciès 6 (AF6) , la bleue de l'AF5, la marron de l'AF4, la noire de l'AF3, la verte de l'AF2, la orange de l'AF1 et la jaune de l'AF0. Le tableau ci-dessus décrit les paramètres renseignés pour la création des distributions.....	191
Figure 5-13 : Résultats des quatre simulations réalisées avec des variogrammes de portées horizontales différentes. La portée verticale est de 1 mètre, le cube de proportion et le germe utilisé sont les mêmes pour l'ensemble des simulations. Pour la légende des associations de faciès, se référer à la Figure 5-8, p. 183. La couche affichée est la couche numéro 50 de la grille de la séquence Ba5. ....	193
Figure 5-14 : Modèle structural en associations de faciès de la séquence de dépôt Ba3. Pour la légende, se référer à la Figure 5-8, p. 183. L'exagération verticale est de facteur 15. ....	194
Figure 5-15 : Modèle structural en associations de faciès de la séquence de dépôt Ba4. Pour la légende, se référer à la Figure 5-8, p. 183. L'exagération verticale est de facteur 15. ....	194
Figure 5-16 : Modèle structural en associations de faciès de la séquence de dépôt Ba5. Pour la légende, se référer à la Figure 5-8, p. 183. L'exagération verticale est de facteur 15. ....	195
Figure 5-17 : Modèle structural en associations de faciès de la séquence de dépôt A1. Pour la légende, se référer à la Figure 5-8, p. 183. L'exagération verticale est de facteur 15. ....	195

- Figure 5-18 : Cartes des épaisseurs érodées sous les quatre limites de séquences. Les valeurs des épaisseurs vont de la couleur la plus claire à la plus foncée de 0 mètre à 40 mètres. .... 197
- Figure 5-19 : Exemple de l'effet de l'érosion sur l'épaisseur des cellules. Les deux images représentent la grille chronostratigraphique de la séquence Ba5 vue depuis l'ouest-nord-ouest. Elles sont centrées sur le bloc nord et la partie nord du bloc sud du Gard. L'échelle de couleur correspond à la variable «épaisseur de cellule». Les valeurs les plus faibles : 0 mètre, sont représentées en rouge, les valeurs les plus importantes : 5 mètres, en blanc. L'image du haut correspond aux valeurs d'épaisseurs de cellule avant érosion, celle du bas, après érosion. .... 198
- Figure 5-20 : Grille structurale après érosion de la série urgonienne créée en assemblant les quatre grilles représentant les quatre séquences. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent aux cortèges de bas niveau, celles coloriées en vert au cortèges transgressifs et celles coloriées en orange aux cortèges de haut niveau. L'extrapolation verticale est de facteur 15. .... 199
- Figure 5-21 : Modèle structurale et stratigraphique renseigné en environnement de dépôt. Les cellules blanches correspondent aux cellules dont l'épaisseur a été réduite à zéro lors de la modélisation de l'érosion..... 200
- Figure 5-22 : Vidéo du modèle stratigraphique érodé renseigné en environnement de dépôt. Les images correspondent aux différentes couches numériques qui défilent dans l'ordre stratigraphique depuis la base de la séquence Ba3 jusqu'au sommet de la séquence A1. Les cellules blanches correspondent aux cellules dont l'épaisseur est égale à zéro (non dépôt ou érosion). 201
- Figure 5-23 : Carte du Sud-Est de la France sur laquelle sont représentées en noir les tracés des différentes coupes présentées de la Figure 5-24, p. 204 à la Figure 5-34, p.215 202..... 202
- Figure 5-24 : Coupe nord-sud du modèle stratigraphique après érosion, du bloc Vercors est au bloc Rhône. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent aux cortèges de bas niveau, celles coloriées en vert au cortèges transgressifs et celles coloriées en orange aux cortèges de haut niveau. L'extrapolation verticale est de facteur 15. .... 204
- Figure 5-25 : Coupe nord nord-est à travers les blocs du Gard et le sud du bloc

Montélimar. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent aux cortèges de bas niveau, celles coloriées en vert au cortèges transgressifs et celles coloriées en orange aux cortèges de haut niveau. L'exagération verticale est de facteur 15. ....	205
Figure 5-26 : Coupe nord-sud à travers les blocs Rhône, Orgon et le sud du bloc Vaucluse - Vercors est. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent aux cortèges de bas niveau, celles coloriées en vert au cortèges transgressifs et celles coloriées en orange aux cortèges de haut niveau. L'exagération verticale est de facteur 15. ....	206
Figure 5-27 : Coupe est-ouest du modèle stratigraphique à travers le bloc est du Vercors. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent aux cortèges de bas niveau, celles coloriées en vert au cortèges transgressifs et celles coloriées en orange aux cortèges de haut niveau. L'exagération verticale est de facteur 15. ....	207
Figure 5-28 : Zoom sur le bloc nord du Gard, vue depuis l'ouest-nord-ouest. L'image est centrée sur la séquence Ba5. Les couches numériques vertes représentent les cortèges transgressifs, les orange les cortèges de haut niveau. Les limites de couches aux sommets des séquences Ba4 et Ba5 ont été dessinées en rouge afin de souligner les terminaisons en toplap. Dans le TST A1, où l'option « parallèle au sommet » avait été choisie pour la distribution des couches numériques, certaines limites ont été dessinées en jaune afin de souligner les terminaisons en downlap. ....	209
Figure 5-29 : Zoom sur la grille structurale après érosion au niveau du passage plate-forme-bassin, au nord de l'Ardèche, vue depuis l'ouest-nord-ouest. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent aux cortèges de bas niveau, celles coloriées en vert aux cortèges transgressifs et celles coloriées en orange aux cortèges de haut niveau. Les lignes vertes représentent les limites de couche. L'exagération verticale est de facteur 15. Sur cette image, les terminaisons en downlap dans les cortèges de bas niveau sont particulièrement visibles.....	209
Figure 5-30 : Image de la couche numérique 174 illustrant la répartition des environnements de dépôt dans les différents blocs. ....	210
Figure 5-31 : Coupe nord-sud du modèle stratigraphique après érosion, renseigné en environnements de dépôt, du bloc Vercors est, au nord, au bloc Rhône, au sud. L'exagération verticale est de facteur 15. ....	211

Figure 5-32 : Coupe nord-nord-est du modèle stratigraphique renseigné en environnements de dépôt, à travers les blocs du Gard et le sud du bloc Montélimar. L'exagération verticale est de facteur 15. ....	212
Figure 5-33 : Coupe nord-sud du modèle stratigraphique renseigné en environnements de dépôt, à travers les blocs Rhône, Orgon et le sud du bloc Vaucluse - Vercors-est. L'exagération verticale est de facteur 15. ....	214
Figure 5-34 : Coupe est-ouest du modèle stratigraphique renseigné en environnements de dépôt à travers le bloc est du Vercors. L'exagération verticale est de facteur 15. ....	215
Figure 5-35 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège de bas niveau de la séquence Ba3, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt. ....	219
Figure 5-36 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège transgressif de la séquence Ba3, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.....	220
Figure 5-37 : Vue de la couche numérique, située au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba3, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.....	221
Figure 5-38 : Vue de la couche numérique, située au sommet du cortège de haut niveau de la séquence Ba3, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.....	222
Figure 5-39 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège de bas niveau de la séquence Ba4, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt. ....	223
Figure 5-40 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège transgressif de la séquence Ba4, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.....	224
Figure 5-41 : Vue de la couche numérique, située au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba4, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.....	225
Figure 5-42 : Vue de la couche numérique, située au sommet du cortège de haut niveau de la séquence Ba4, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt. ....	226

Figure 5-43 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège de bas niveau de la séquence Ba5, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt. ....	227
Figure 5-44 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège transgressif de la séquence Ba5, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.....	228
Figure 5-45 : Vue de la couche numérique, située au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba5, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.....	229
Figure 5-46 Vue de la couche numérique, située au sommet du cortège de haut niveau de la séquence Ba5, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt. ....	230
Figure 5-47 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège de bas niveau de la séquence A1, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt. ....	231
Figure 5-48 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège transgressif de la séquence A1, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt. ....	232
Figure 5-49 : Vue de la couche numérique, située au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence A1, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.....	233
Figure 5-50 Vue de la couche numérique, située au sommet du cortège de haut niveau de la séquence Ba5, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt. ....	234
Figure 5-51 : Graphique représentant les valeurs de facteur commun redimensionné en fonction des valeurs d'accommodation. ....	237
Figure 6-1 : Reconstruction paléogéographique au niveau de l'anomalie magnétique M0 (limite Barrémien-Aptien). NPF correspond à la faille Nord Pyrénéenne. (Schettino <i>et al.</i> , 2011).....	247
Figure 6-2 : Reconstruction paléogéographique au niveau de l'anomalie M0 (limite Barrémien-Aptien). (Handy <i>et al.</i> , 2010) .....	247
Figure 6-3 : Reconstitution paléogéographique au niveau de l'anomalie M0 d'après Olivet, 1996. ....	249

Figure 6-4 : Reconstitution paléogéographique au niveau de l'anomalie M0 d'après Sibuet <i>et al.</i> , 2004.....	250
Figure 6-5 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien du Sud-Est de la France. Les flèches bleues représentent les directions d'épaississement de la série, les zones rouges représentent les zones de hauts fonds.....	254
Figure 7-1 : Coupe nord sud à travers l'ensemble du modèle renseignés en cortège sédimentaires. ....	271
Figure 7-2 : coupe est-ouest du modèle renseigné en environnement de dépôt à travers le massif du Vercors. Pour l'échelle des environnements de dépôts, se référer au tableau de faciès chapitre 3, paragraphe 3.3, p. 79. ....	273
Figure 7-3 : coupe nord-ouest - sud-est du modèle renseigné en environnement de dépôt à travers les monts du Vaucluse et la Camargue. Pour l'échelle des environnements de dépôts, se référer au tableau de faciès chapitre 3, paragraphe 3.3, p. 79. ....	273
Annexe 5 : Log stratigraphique de la coupe de l'Aven de Cal (Gard). ....	X
Annexe 6: Log stratigraphique de la coupe de l'Aven de l'Agas (Gard). ....	XI
Annexe 7: Log stratigraphique de la coupe de La Baume (Gard). ....	XII
Annexe 8: Log stratigraphique de la coupe des Angostrines (Gard).....	XIII
Annexe 9: Log stratigraphique de la coupe du Mont Bouquet (Gard).....	XIV
Annexe 10: Log stratigraphique de la coupe de Navacelles (Gard). ....	XV
Annexe 11: Log stratigraphique de la coupe de Sauzet (Gard). ....	XVI
Annexe 12: Log stratigraphique du puits de Belvezet (Gard).....	XVII
Annexe 13: Log stratigraphique du puits de Collias (Gard).....	XVIII
Annexe 14: Log stratigraphique du puits de Collias 2 (Gard).....	XIX
Annexe 15: Log stratigraphique du puits de Combas (Gard).....	XX
Annexe 16: Log stratigraphique du puits de Connaux (Gard).....	XXI
Annexe 17: Log stratigraphique du puits de Flaux (Gard). ....	XXIII
Annexe 18: Log stratigraphique du puits de Flaux 2 (Gard). ....	XXIV
Annexe 19: Log stratigraphique du puits du Blanquau (Gard).....	XXV

Annexe 20: Log stratigraphique du puits de Fontarèche (Gard).....	XXVII
Annexe 21: Log stratigraphique du puits de Lembarnès (Gard).....	XXVIII
Annexe 22: Log stratigraphique du puits de Saint-Anastasie (Gard).....	XXIX
Annexe 23: Log stratigraphique du puits de Sagries (Gard).....	XXXI
Annexe 24: Sommet du log stratigraphique du puits de Serviers (Gard). ....	XXXII
Annexe 25: base du log stratigraphique du puits de Serviers (Gard). ....	XXXIII
Annexe 26: Log stratigraphique du puits d'Uzes (Gard).....	XXXV
Annexe 27: Log stratigraphique du puits de Verfeuil (Gard). ....	XXXVII
Annexe 28: Log stratigraphique du puits de Saint-Maximin (Gard).....	XXXVIII
Annexe 29: Log stratigraphique de la coupe d'Aiguèze (Ardèche). ....	XXXIX
Annexe 30: Log stratigraphique de la coupe d'Autridge (Ardèche).....	XL
Annexe 31: Log stratigraphique de la coupe du Col de la Serre (Ardèche).....	XLI
Annexe 32: Log stratigraphique de la coupe de Chames (Ardèche). ....	XLIII
Annexe 33: Log stratigraphique de la coupe de Font Vive (Ardèche).....	XLIV
Annexe 34: Sommet du log stratigraphique de la coupe de Pont de Laval (Ardèche). ....	XLV
Annexe 35: Partie centrale du log stratigraphique de la coupe de Pont de Laval (Ardèche). ....	XLVI
Annexe 36: Base du log stratigraphique de la coupe de Pont de Laval (Ardèche).....	XLVII
Annexe 37: Log stratigraphique de la coupe de Rouvière (Ardèche).....	XLIX
Annexe 38: Log stratigraphique de la coupe de Serrou (Ardèche).....	LI
Annexe 39: Log stratigraphique de la coupe de Saint-Marcel (Ardèche). ....	LII
Annexe 40: Log stratigraphique de la coupe de Viviers gare (Ardèche). ....	LIII
Annexe 41: Log stratigraphique de la coupe de Viviers Saint Montant (Ardèche). ....	LIV
Annexe 42: Sommet du log stratigraphique du Puits du Garn (Ardèche). ....	LV
Annexe 43: Base du log stratigraphique du Puits du Garn (Ardèche). ....	LVI
Annexe 44: Log stratigraphique du Puits de Barjac (Ardèche).....	LIX
Annexe 45: Sommet du log stratigraphique de la coupe de la Candelle(Provence).....	LX



Annexe 46: Base du log stratigraphique de la coupe de la Candelle (Provence). .....	LXI
Annexe 47: Log stratigraphique de la coupe du Devenson (Provence). .....	LXIII
Annexe 48: Log stratigraphique de la coupe des Goudes (Provence). .....	LXIV
Annexe 49: Log stratigraphique de la coupe de Port-Miou (Provence). .....	LXV
Annexe 50: Sommet du log stratigraphique de la coupe de Cire-Nesque (Vaucluse). .....	LXVI
Annexe 51: Base du log stratigraphique de la coupe de Cire-Nesque (Vaucluse). .....	LXVII
Annexe 52: Log stratigraphique de la coupe de Fontaine (Vaucluse). .....	LXIX
Annexe 53: Log stratigraphique du puits d'Orgon (Vaucluse). .....	LXXI
Annexe 54: Log stratigraphique de la coupe de Rustrel (Vaucluse). .....	LXXII
Annexe 55: Log stratigraphique de la coupe du Fâ (Vercors). .....	LXXIII
Annexe 56: Log stratigraphique de la coupe de Lachau (Vercors). .....	LXXV
Annexe 57: Log stratigraphique de la coupe du Mortier (Vercors). .....	LXXVII
Annexe 58: Log stratigraphique de la coupe du Nan (Vercors). .....	LXXIX
Annexe 59: Log stratigraphique de la coupe de Saint Vincent de la Commanderie (Vercors). .....	LXXXI
Annexe 60: Log stratigraphique de la coupe de Fogés (Vercors). .....	LXXXII
Annexe 61 : Carte d'épaisseur du cortège de bas niveau de la séquence Ba3. ....	LXXXIII
Annexe 62 : Carte d'épaisseur du cortège transgressif de la séquence Ba3. ....	LXXXIV
Annexe 63 : Carte d'épaisseur du cortège de haut niveau de la séquence Ba3. ....	LXXXV
Annexe 64 : Carte d'épaisseur du cortège de bas niveau de la séquence Ba4. ....	LXXXVI
Annexe 65 : Carte d'épaisseur du cortège transgressif de la séquence Ba4. ....	LXXXVII
Annexe 66 : Carte d'épaisseur du cortège de haut niveau de la séquence Ba4. ....	LXXXVIII
Annexe 67 : Carte d'épaisseur du cortège de bas niveau de la séquence Ba5. ....	LXXXIX
Annexe 68 : Carte d'épaisseur du cortège transgressif de la séquence Ba5. ....	XC
Annexe 69 : Carte d'épaisseur du cortège de haut niveau de la séquence Ba5. ....	XCI
Annexe 70 : Carte d'épaisseur du cortège de bas niveau de la séquence A1. ....	XCII
Annexe 71 : Carte d'épaisseur du cortège transgressif de la séquence A1. ....	XCIII

Annexe 72 : Carte d'épaisseur du cortège de haut niveau de la séquence A1.....	XCIV
Annexe 73 : Carte des épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence Ba3 érodés au niveau de la limite de la séquence Ba4.....	XCv
Annexe 74 : Carte des épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence Ba4 érodés au niveau de la limite de la séquence Ba5.....	XCvI
Annexe 75 : Carte des épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence Ba5 érodés au niveau de la limite de la séquence A1. ....	XCvII
Annexe 76 : Carte des épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence A1 érodés au niveau de la limite de séquence A2. ....	XCvIII
Annexe 77 : Carte de paléoprophondeur d'eau à la base de la séquence Ba3. ....	XCIX
Annexe 78 : Carte de paléoprophondeur d'eau au niveau de la surface transgressive de la séquence Ba3. ....	C
Annexe 79 : Carte de paléoprophondeur d'eau au niveau la surface d'inondation maxi- mum de la séquence Ba3. ....	CI
Annexe 80 : Carte de paléoprophondeur d'eau au sommet de la séquence Ba3, au niveau de la limite de séquence Ba4. ....	CII
Annexe 81 : Carte de paléoprophondeur d'eau au niveau de la surface transgressive de la séquence Ba4. ....	CIII
Annexe 82 : Carte de paléoprophondeur d'eau au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba4.....	CIV
Annexe 83 : Carte de paléoprophondeur d'eau au sommet de la séquence Ba4, au niveau de la limite de séquence Ba5. ....	CV
Annexe 84 : Carte de paléoprophondeur d'eau au niveau de la surface transgressive de la séquence Ba5.....	CVI
Annexe 85 : Carte de paléoprophondeur d'eau au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba5.....	CVII
Annexe 86 : Carte de paléoprophondeur d'eau au sommet de la séquence Ba5, au niveau de la limite de la séquence A1.....	CVIII
Annexe 87 : Carte de paléoprophondeur d'eau au niveau de la surface transgressive de la séquence A1. ....	CIX

Annexe 88 : Carte de paléoprofondeur d'eau au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence A1.....	CX
Annexe 89 : Carte de paléoprofondeur d'eau au sommet de la séquence A1, au niveau de la limite de séquence A2.....	CXI





# Chapitre 1 : L'Urgonien, Généralités

## Résumé :

L'Urgonien du Sud-Est de la France est étudié depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle et correspond à la formation carbonatée qui s'est développée sur les bordures des bassins Vocontien et Bédoulien au Crétacé inférieur. Cette période est caractérisée par un climat chaud et humide, propice à la production carbonatée, et par l'occurrence d'événements anoxiques.

La fosse Vocontienne, ou bassin Vocontien, correspond à la zone profonde du bassin du Sud-Est de la France, sur le pourtour du quelle la plateforme urgonienne s'est développée.

Dans le but de caractériser l'évolution de cette plateforme carbonatée, ainsi que les facteurs l'ayant influencé, une méthode et des outils communs ont été utilisés afin d'analyser de manière homogène l'Urgonien de l'ensemble du Sud-Est de la France. Afin d'obtenir le modèle d'évolution le plus réaliste possible, une méthode pluridisciplinaire intégrant sédimentologie, biostratigraphie, géochimie, tectonique et modélisation a été adoptée.

En plus de l'intérêt scientifique, étant donné l'analogie entre l'Urgonien du Sud-Est de la France et les formations carbonatées réservoirs du Moyen-Orient, l'établissement d'un modèle d'évolution de l'Urgonien présente un intérêt pétrolier.

# 1 LE CRÉTACÉ INFÉRIEUR

Le Crétacé inférieur est marqué par la dislocation de la Pangée qui est principalement due à l'ouverture de l'Océan Atlantique. Cette océanisation, accompagnée d'une forte activité magmatique, ainsi que la mise en place des LIPS (Large Igneous Provinces), notamment ceux de Paraña-Etendeka (Hauterivien), Ontong Java (Barrémien tardif - Aptien inférieur) et Kerguelen (Aptien supérieur) influence fortement les conditions environnementales globales. La création de plancher océanique, chaud et peu dense induit la remontée du niveau marin (Skelton, 2002). D'autre part, la forte activité magmatique semble expliquer la forte pression partielle en CO<sup>2</sup> qui est attribuée à cette période (Berner *et al.*, 2001 ; Royer, 2006). Le climat « greenhouse » connu pour certaine période du Crétacé (Föllmi, 2012) peut, en grande partie, être expliqué par cette importante quantité de CO<sup>2</sup> présent dans l'atmosphère.

L'élévation du niveau marin pendant une période présentant un climat chaud et humide a provoqué un important développement des plateformes carbonatées. L'Urgonien, étant un faciès caractéristique de telles plateformes, s'est alors fortement répandu dans les régions tropicales et sub-tropicales. On l'observe aujourd'hui dans de nombreux pays, du Mexique au Japon en passant par le Sud-Est de la France (Sano, S.I., 1992 ; Ager, 1981 ; Arnaud, 1981).

Il s'est également fortement développé dans les pays du Moyen-Orient où il constitue aujourd'hui les formations carbonatées réservoirs les plus importantes au monde.

Outre ce climat « Greenhouse », le Crétacé inférieur est également caractérisé par la plus haute densité d'occurrence des événements anoxiques tels que les événements Faraoni et Selli (Föllmi *et al.*, 2012). La production carbonatée est dépendante des variations climatiques et des perturbations dans le cycle du carbone (Bonin, 2011). Afin de proposer un modèle d'évolution de la plateforme urgonienne réaliste, il est donc nécessaire de caractériser le contexte paléo-environnemental et paléo-climatologique de la période pendant laquelle elle s'est développée.

Pour ce faire, cette période de développement doit tout d'abord être bien définie. Or, les datations de la mise en place et des différents stades d'évolution de la plateforme urgonienne sont encore très controversées (Godet *et al.*, 2012 et 2010 ; Conrad *et al.*, 2011). L'utilisation de la géochimie (notamment des isotopes stables) semble être un outil capable d'apporter des réponses fiables à cette problématique. La plupart des courbes de  $\delta^{13}\text{C}$  proviennent de série de bassin (Godet *et al.* 2006, Menegatti *et al.*, 1998 ; Ebra *et al.*, 1999 ; Sprovieri *et al.* 2006 ; Emmanuel

*et al.*, 1993). Peu d'auteurs ont étudié les variations du  $\delta^{13}\text{C}$  dans des séries de plateforme et les ont corrélées aux signaux provenant des séries de faciès plus profond (Huck *et al.*, 2011).

L'Urgonien est un faciès qui a été finement étudié par de nombreux auteurs depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. Mais, la plupart de ces descriptions sont d'ordre sédimentologiques, stratigraphiques et/ou paléontologiques (cf. Chapitre 2). Très peu d'auteurs se sont intéressés à l'influence que pouvait avoir la paléotectonique sur la géométrie de la série urgonienne (Arnaud, 1988).

Afin d'avoir une conception du développement de la plateforme urgonienne, de sa géométrie et de sa structure la plus réaliste possible, une étude pluridisciplinaire de l'Urgonien du Sud-Est de la France a été menée. Des données sédimentologiques, biostratigraphiques et géochimiques ont été récoltées et étudiées afin d'obtenir un modèle d'âge et un découpage stratigraphique de la série urgonienne cohérents et fiables. L'ensemble de ces données ont ensuite été intégrées dans un contexte paléotectonique global et régional. La cohérence géométrique du modèle de développement de la plateforme urgonienne a finalement été testée en créant un modèle numérique qui intègre l'ensemble des données acquises et des concepts envisagés.



## 2 HISTORIQUE ET DÉFINITION

Alcide Dessalines d'Orbigny, naturaliste, explorateur, malacologiste et paléontologue français, définit pour la première fois en 1847 le terme « Urgonien » (d'Orbigny, 1847-1849). Il le définit alors comme un étage géologique se situant entre le Néocomien et l'Aptien, et qui se distingue par la présence de certaines espèces de Bivalves (*Chama ammonia*) et de Céphalopodes (d'Orbigny, 1847-1849, Arnaud, 1981). Le terme « Urgonien » fait référence à la ville d'Orgon choisie comme localité-type par A. d'Orbigny. L'Urgonien est alors représenté par de nombreux faciès (calcaire à rudistes, calcaire à céphalopodes, marno-calcaire à céphalopodes...).

Le choix de la localité-type d'Orgon pour l'Urgonien par Alcide d'Orbigny, où seuls les calcaires à rudistes sont représentés, fut la cause de nombreux débats jusqu'au début du xx<sup>e</sup> siècle.

En 1862, H. Coquand proposa et définit un nouvel étage : le Barrémien (Coquand, 1862). Il le décrit alors comme correspondant au calcaire à Céphalopodes dans lequel se trouvent les mêmes espèces d'Ammonites que celles décrites par A. d'Orbigny pour l'Urgonien. Il ne considère pas le niveau à rudistes (*Chama ammonia*) synchrone des faciès à Céphalopodes. En 1864, ce même auteur, d'après ces observations en Aragon, en viendra à la conclusion que l'Urgonien est un équivalent de l'Aptien et propose même la suppression de ce terme.

F. Leenhardt en 1883 d'après ses travaux dans le Ventoux (Leenhardt, 1883), ainsi que W. Kilian en 1888 d'après ses observations dans la montagne de Lure (Kilian, 1888) en étaient arrivés aux mêmes conclusions : l'Urgonien se superpose au terme Barremien de Coquand et correspond à l'étage aptien. F. Leenhardt propose alors la suppression du terme Urgonien et W. Kilian de garder uniquement les termes Barremien et Aptien comme valeur d'étage.

Après plusieurs années de polémiques et de discussions, c'est à partir de 1895 que Kilian et ses élèves, dont V. Paquier, prouve le passage latéral des calcaires à rudistes aux faciès à Céphalopodes. Il propose alors que le terme Urgonien corresponde à « un faciès calcaire subré-cifal hétérochrone englobant en partie le Barremien et l'Aptien » (Lethaea, 1907 et 1910, Arnaud, 1981).

Encore aujourd'hui, le terme Urgonien désigne de manière commune un faciès calcaire à rudistes, qui ne prend plus en compte les espèces de Céphalopodes si chères à A. d'Orbigny.

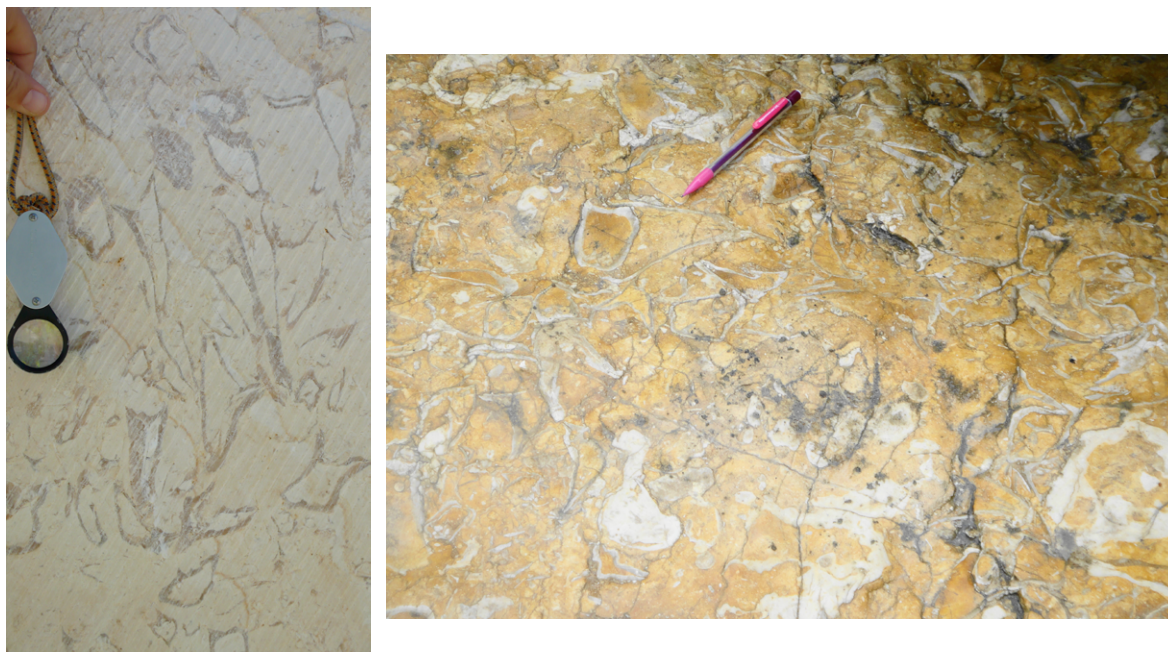


Figure 1-1 : Calcaire Urgonien à rudistes, carrière des Conquettes à gauche, La Baume à droite, Gard.

Dans cette étude, le terme «Urgonien» désigne l'ensemble des roches carbonatées formées par consolidation des sédiments déposés sur les plateformes et les bordures de plateformes des bassins Vocontien et de la Bédoule. La formation ou série urgonienne désigne donc des calcaires dont les faciès vont des plus internes (faciès de plage, sub-émersif ou émersif) au faciès hémipélagiques (faciès à échinodermes ou à spicules d'éponge) en passant par les faciès de plateformes (à rudistes et/ou à coraux) et par les faciès de bordure de plateforme (faciès granulaires). Il sera nommé «Urgonien sensu stricto» les calcaires de lagon à rudistes.

Dans le paysage, les calcaires urgoniens se distinguent par leur teinte claire, presque blanche. Ils apparaissent souvent sous forme de falaise de par leur caractère massif et sont le plus souvent recouverts par la végétation.

### 3 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Avec les bassins de Paris et d'Aquitaine, le bassin du Sud-Est de la France est l'un des bassins sédimentaires majeurs qui s'est développé en France, au Mésozoïque. Son évolution s'étend sur une période d'environ 180 millions d'années.

A la suite de l'orogénèse hercynienne (Carbonifère-Permien), le supercontinent « Pangée » commence à se disloquer. En même temps que l'océan « Paléotéthys » subducte au nord sous la « Pangée », un nouvel océan, la « Néotéthys » s'ouvre (cf. Figure 1-2, p. 34). Cette dynamique d'extension lithosphérique se poursuit au cours du Trias où les prémices des ouvertures de l'Atlantique central et de la Téthys Alpine ont des répercussions distensives dans le Sud-Est de la France. (Stampfli *et al.*, 2002 et 2004).

Ce rifting intracontinental réactive les grands accidents hercyniens de direction N 40° provoquant la subsidence de certains blocs. Ce sont ces subsidences qui sont à l'origine, entre autre, du bassin du Sud-Est de la France (Curnelle *et al.*, 1986). Il est alors limité par les accidents de la bordure Cévenole et Ardéchoise à l'ouest et au nord-ouest et par la faille de la Durance à l'est.

C'est ensuite le jeu de ces différents accidents contrôlé par le mouvement des plaques lithosphériques qui va contrôler la morphologie du bassin et, par conséquent, la nature des sédiments qui vont s'y déposer (Baudrimont, 1977).

Lors de l'ouverture du bassin du Sud-Est de la France au Trias, une première mégaséquence se dépose. La création du bassin ayant lieu en domaine continental, les premiers sédiments sont détritiques et correspondent à des cônes alluviaux ou à des plaines alluviales. Une mince communication avec la Paléotéthys à l'est et au sud-est provoque ensuite la première mise en eau du bassin. Les dépôts deviennent alors argilo-carbonatés. Au Trias supérieur, un confinement généralisé combiné à de la subsidence va induire le dépôt de plus de 500 mètres de sédiments argilo-évaporitiques.

A la fin du Trias, la géométrie du bassin du Sud-Est est en place. A partir du Lias ont lieu le rifting puis l'ouverture de l'océan Atlantique central ainsi que de la Téthys alpine. Ces phénomènes induisent un approfondissement progressif du bassin du Sud-Est de la France dans lequel les premiers sédiments marins ouverts se déposent au centre du bassin. Ce n'est qu'à la fin du

Sinémurien que les dépôts carbonatés et évaporitiques de bordure de bassin sont recouverts par des sédiments marins.

Au Lias supérieur et au Dogger, une deuxième mégaséquence se dépose, contrôlée par les variations eustatiques. A ce facteur eustatique se surimpose une importante subsidence au centre du bassin augmentant notablement la bathymétrie jusqu'à plus de 1000 mètres de profondeur. En résulte le dépôt de 3000 à 4000 mètres de sédiments argilo-marneux nommées les « Terres noires ». D'après Lemoine *et al.* (1984), l'évolution de la morphologie du bassin, et par conséquent des sédiments qui s'y déposent, est à mettre en relation avec l'ouverture de la Téthys alpine aussi appelée « Océan Liguro-Piémontais ».

Au Jurassique supérieur, la morphologie du bassin du Sud-Est va être affectée par la subsidence de la marge passive qui le sépare de la Téthys alpine à l'est. Un profond sillon orienté est-ouest se forme alors au milieu du bassin du Sud-Est de la France : le bassin Vocontien ou fosse Vocontienne. De faibles épaisseurs de sédiments de bassin profond argilo-carbonatés s'y déposent alors, et les phénomènes de resédimentations et glissements sous marins y sont fréquents.

Au Crétacé inférieur, la géométrie du bassin du Sud-Est de la France est très différente de celle héritée de sa formation au Trias. Il s'y dépose plus de 2500 mètres de dépôts argilo-calcaires à l'inverse du Bassin Vocontien où seuls des sédiments pélagiques s'y déposent. Ce n'est qu'à partir du Crétacé inférieur que les faciès de plateforme et de bordure de plateforme apparaissent. C'est sur la géométrie et les conditions de développement de cette plateforme dite urgoniennne que porte cette étude.

La progradation des corps sédimentaires urgoniens marque le début du comblement de la zone profonde du bassin du Sud-Est de la France.

En effet, dès le Crétacé moyen, à l'Aptien/Albien des structures synsédimentaires est-ouest associées à des réductions d'épaisseurs importantes et à des phénomènes d'érosion se forment. (Curnelle *et al.*, 1986, Masse, 1993). Ces structures sont le résultat de l'influence de la migration sénestre de l'Ibérie et de l'ouverture océanique du Golfe de Gascogne qui se propage vers l'est sous forme de rift (Curnelle *et al.*, 1986). Des dépôts détritiques réapparaissent alors sur les bordures du bassin du Sud-Est de la France. A la fin de l'Albien et au Cénomanienn, une des structures est-ouest se soulève particulièrement : le bombement, ou isthme Durancien. Cette



zone est soumise à l'érosion et au développement de latérites et de Bauxites. Un bassin provençal se différencie au sud de ce bombement : le bassin de la Bédoule ou bassin sud-provençal.

La compression nord-sud au Crétacé supérieur provoquée par la transpression sénestre de l'Ibérie, elle même sollicitée par la plaque Afrique, contre la plaque européenne engendre le plissement et finalement l'émersion du bassin du Sud-Est de la France. La phase majeure de sédimentation de ce bassin est alors terminée, seules quelques aires de sédimentation éparses perdureront pendant le Tertiaire, contrôlée cette fois par la cinématique alpine.

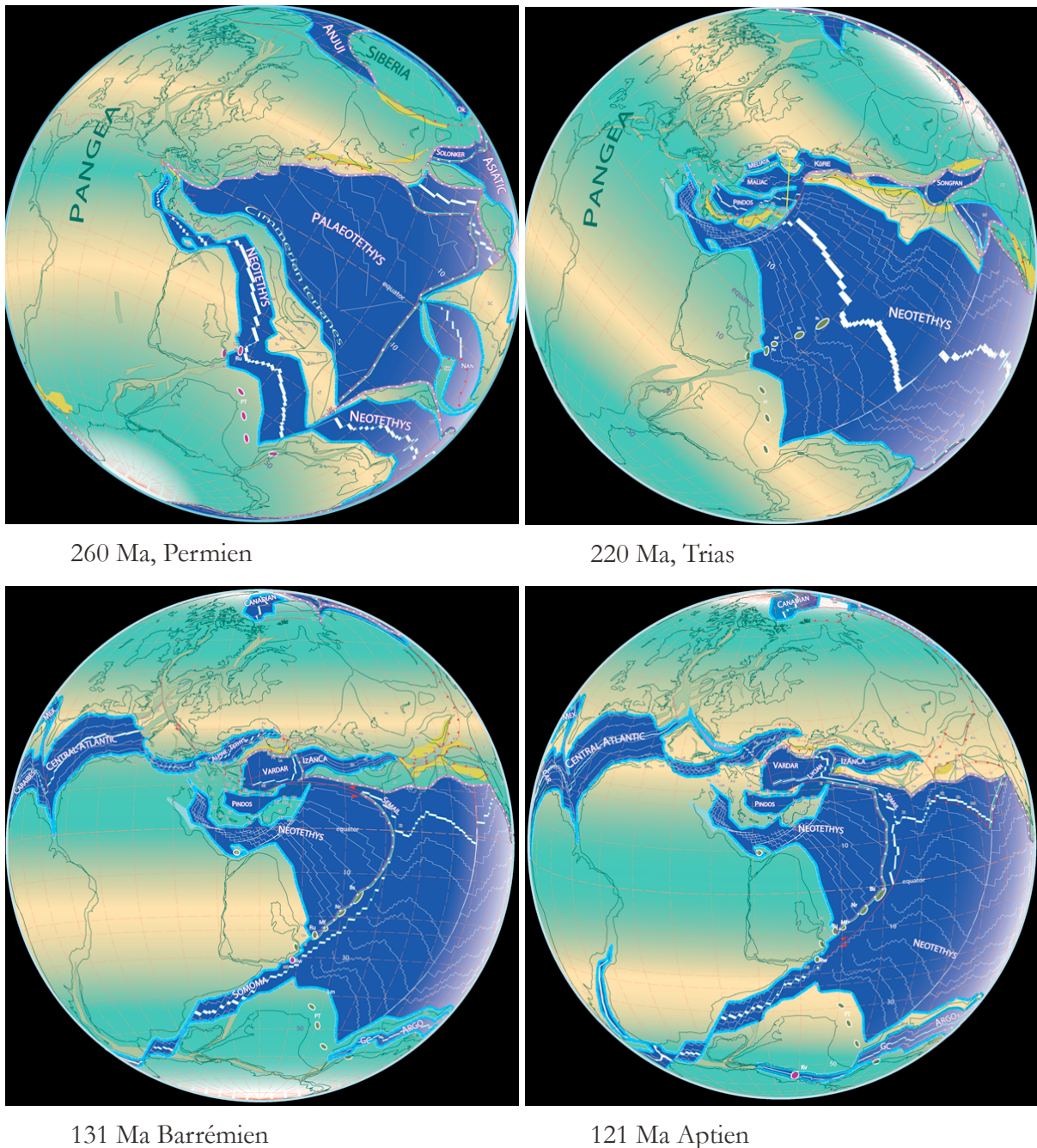


Figure 1-2 : Evolution de la paléogéographie mondiale du Permien à l'Aptien (Stampfli *et al.*, 2004).

## 4 LES PROBLÉMATIQUES

De nombreux travaux ont été réalisés par différentes équipes de recherche sur l'Urgonien du Sud-Est de la France et des pays voisins (cf. Orbigny, 1847 ; Conrad, 1969 ; Masse, 1976; Masse *et al.*, 2013 ; Arnaud-Vanneau 1980 ; Arnaud 1981 ; Charollais *et al.*, 1998 ; Bodin *et al.*, 2006 ; Godet *et al.*, 2010 et 2012 ; Bastide *et al.*, 2012 ; Léonides *et al.*, 2012 ; Clavel *et al.* 2013 ; Granier, 2013 ; Huck *et al.*, 2013 ; ...). Chaque équipe a étudié un secteur particulier (Vercors, Provence, Ardèche, Suisse) avec des outils (biostratigraphie, géochimie, stratigraphie séquentielle...) différents. Des discussions entre certaines équipes, notamment lors des Colloques sur le Crétacé inférieur (1963, 1979), ont permis l'élaboration d'ouvrages synthétiques (Geobios) intégrant, entre autre, l'ensemble des secteurs du Sud-Est de la France (cf. Figure 1-3, p. 35). A ces occasions, des cartes paléogéographiques générales ont été dessinées (Arnaud-Vanneau *et al.*, 1979). Mais, aucune étude intégrant l'ensemble des secteurs du Sud-Est de la France n'avait jusqu'à présent été réalisée avec des outils communs et des méthodes communes.

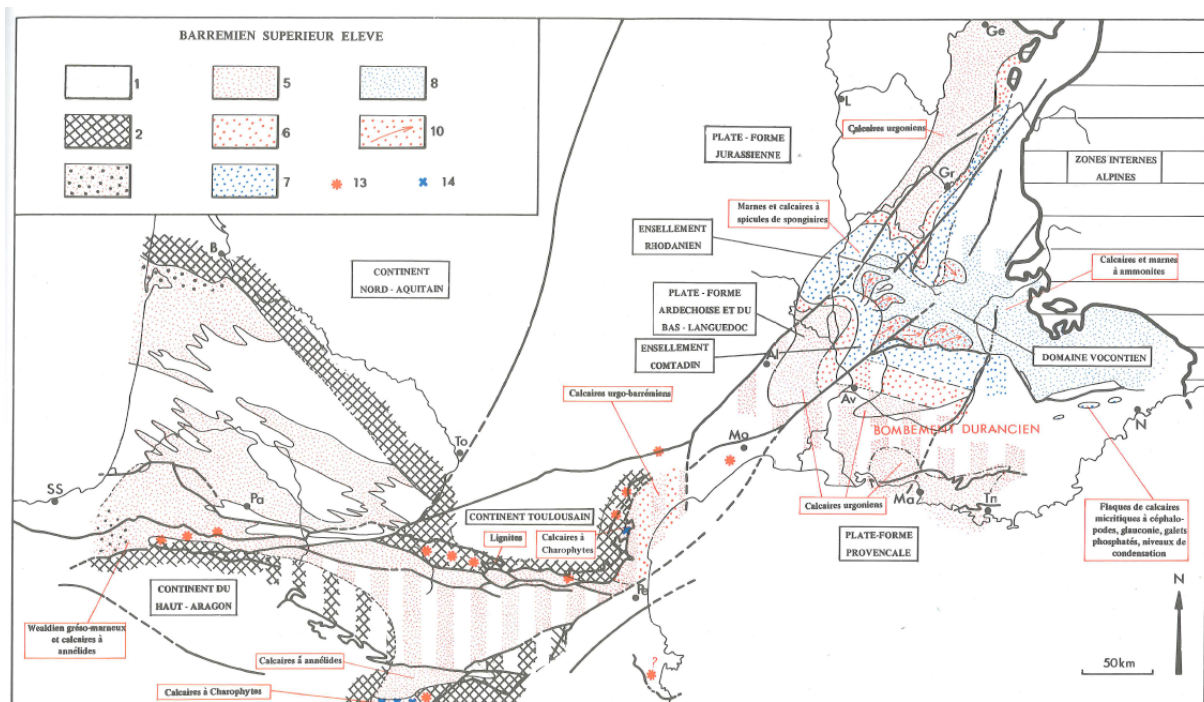


Figure 1-3 : Carte de répartition des faciès carbonatés à la fin du Barrémien supérieur dans le Sud de la France et le Nord de l'Espagne. (Arnaud-Vanneau *et al.* 1979)

D'un secteur à un autre, différentes organisations séquentielles, géométriques et faciologiques de la série urgonienne ont été décrites (Arnaud, 1981 ; Arnaud-Vanneau, 1980 ; Arnaud-Vanneau *et al.*, 2005 ; Godet, 2006 ; Godet *et al.*, 2005 ; Masse, 1976 et 1993 ; Masse *et al.*, 2011, ...). Au sein d'un même secteur, des variations d'épaisseurs et d'environnements de dépôt dues

à des subsidences différentielles ont également été observées par plusieurs auteurs (Arnaud-Vanneau, 1980 ; Arnaud, 1981 ; Masse, 1976 ; Cotillon, 1979...). Il est donc admis que la série urgonienne n'est ni homogène, ni uniforme.

Comment la paléogéographie du Sud-Est de la France a-t-elle évolué pendant le développement de la plateforme urgonienne ? Dans quelles conditions paléoenvironnementales s'est-elle développée ? Quelle a été l'influence de la paléotectonique barrémo-aptienne sur la géométrie et l'architecture de l'Urgonien ? Ce sont ces problématiques qui seront abordées dans cette étude.

## 5 LES OBJECTIFS

Il s'agit de proposer un modèle d'évolution de la plateforme urgonienne qui respecte les données accessibles aujourd'hui. L'organisation séquentielle de l'Urgonien doit donc être définie et sa géométrie caractérisée. Ce modèle doit également être cohérent avec le contexte tectonique régional et mondial qui est aujourd'hui connu pour cette époque géologique.

Afin de pouvoir proposer un modèle de l'ensemble du Sud-Est de la France, des méthodes et des outils communs doivent être définis (Biostratigraphie, modèle de faciès, géochimie). Des données doivent donc être recueillies sur l'ensemble des secteurs et étudiées de manière uniforme.

Un des premiers objectifs consistera à corrélérer les surfaces stratigraphiques, déterminées grâce aux observations de terrain et à l'étude des échantillons prélevés. Cela permettra alors d'apprécier les variations d'épaisseurs et d'environnement de dépôt de chaque cortège sur les bordures des bassins Vocontien et Bédoulien.

En intégrant les informations disponibles dans la littérature sur le contexte tectonique de la période barrémo-aptienne, un modèle d'évolution de la plateforme urgonienne pourra alors être proposé.

L'Urgonien est un analogue des formations Kharaib, Hawar et Shu'aiba du Moyen-Orient (cf. Figure 1-4, p. 38) (Masse, 1992, 1995; Dercourt *et al.*, 2000). Pendant que la plateforme urgonienne se développait sur la marge nord de la Téthys, les séries du Moyen-Orient se déposaient sur la marge sud du même océan. Sur les deux continents, ces formations sont principalement constituées par des faciès de lagon interne à rudistes. On retrouve à la base de l'Aptien, au Moyen-Orient comme en France, un niveau riche en Orbitolinidés (*Palorbitolina lenticularis*) (Yose *et al.*, 2010; van Buchem *et al.*, 2010). Les mêmes faciès, microfaciès et faunes sont retrouvés dans ces formations ce qui implique que les mêmes conditions environnementales y étaient réunies au moment du dépôt.

Être capable d'apprécier la géométrie de la série urgonienne et de caractériser les principaux facteurs l'ayant influencé permet de mieux appréhender le développement des formations au Moyen-Orient. Ces formations représentant les plus importants réservoirs carbonatés du monde (Harris *et al.*, 1968 ; Johnson *et al.*, 1975 ; Hassan *et al.*, 1981 ; Litsey *et al.*, 1983 ;



Alsharhan, 1990, 1993 ; Borgomano *et al.*, 2002 ; Al Ghamdi *et al.*, 2010 ; Amthor *et al.*, 2010), comprendre les mécanismes de leur mise en place est d'un grand intérêt pétrolier.

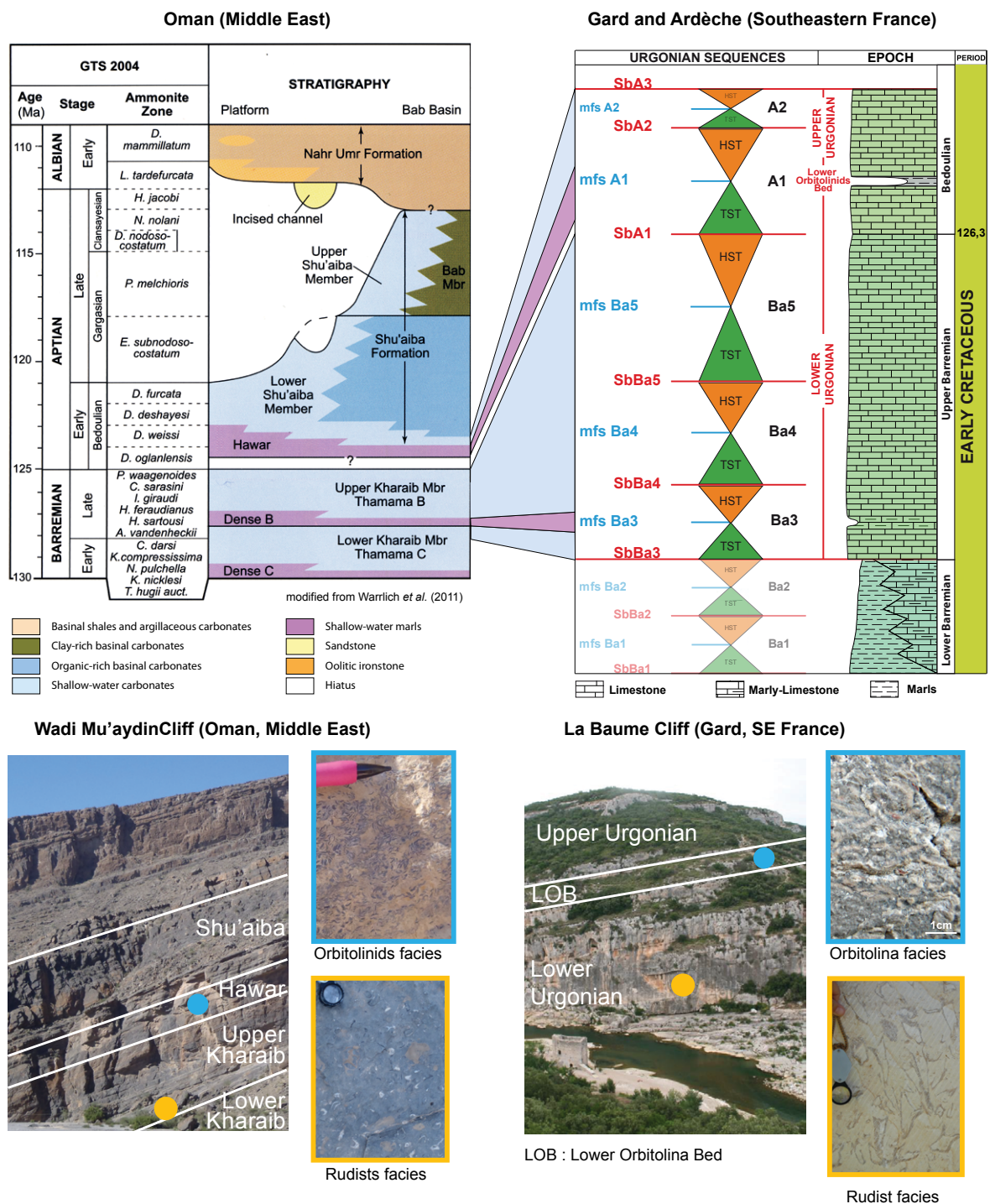


Figure 1-4 Correspondance entre les séries du Moyen-Orient et l'Urgonien du Sud-Est de la France.

## 6 APPROCHE ET MÉTHODES UTILISÉES

Afin d'obtenir une conception réaliste du développement de la plateforme urgonienne, cette étude a été menée avec une approche pluridisciplinaire. Dans un premier temps, des données de terrain ont été accumulées. Il s'agit de portions de série urgonienne étudiées et échantillonnées, réparties sur l'ensemble du Sud-Est de la France. Certaines coupes ont été levées le long de routes ou de chemins, d'autres en rappel, le long de falaises quand la végétation ne permettait pas d'approcher les affleurements autrement. Des échantillons de roche ont également pu être récupérés pendant le forage de plusieurs puits permettant l'acquisition de données inédites.

Associée aux observations de terrain, l'étude microscopique des lames minces, réalisées à partir de chaque échantillon, a permis le découpage séquentiel de chaque série urgonienne étudiée. Afin de permettre une étude comparable de chaque coupe, une même charte biostratigraphique fut utilisée et un modèle de faciès élaboré. Des analyses géochimiques ont également été réalisées sur plusieurs coupes clés permettant de confirmer le modèle stratigraphique ainsi que les corrélations induites par le découpage séquentiel des coupes.

Les variations d'épaisseur et d'environnement de dépôt de la série urgonienne ont alors pu être appréciées. Leurs interprétations ont permis de déterminer les facteurs qui ont influencés sa géométrie et de concevoir l'évolution de la paléogéographie du Sud-Est de la France.

La création d'un modèle numérique en trois dimensions de l'Urgonien du Sud-Est de la France respectant l'ensemble des données acquises permet de valider la cohérence géométrique des conceptions envisagées.



# Chapitre 2: Les études précédentes

## Résumé :

Dans ce chapitre sont résumés, par secteur, les différents travaux ayant conduit, depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, aux attributions stratigraphiques des séries urgoniennes affleurant dans le Sud-Est de la France.

Les travaux de F. Leenhardt, W. Kilian, A. Torcapel, C. Lory et H. Coquand, pour ne citer qu'eux, principalement porté sur l'Urgonien des secteurs du Vercors et du Vaucluse, permirent les premières attributions stratigraphiques complétées et précisées par J. Goguel, F. Rivier et V. Paquier pendant la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle.

Par la suite, la Provence devint le terrain de prédilection de J.P. Masse, le Vercors celui d'A. Arnaud-Vanneau et d'H. Arnaud et l'Ardèche celui de D. Lafarge et C. Contensuzas. D'autres auteurs, tels que R. Busnardo, B. Clavel et J. P. Thieuloy travaillèrent également au découpage stratigraphique de la série urgonienne du Sud-Est de la France.

Actuellement, la base de la série urgonienne est proposée hauterivienne par certains auteurs (J. P. Masse en Provence, B. Clavel en Ardèche et dans le Jura Suisse) et datée de la limite Barrémien inférieur- Barrémien supérieur par d'autres (A. & H. Arnaud dans le Vercors).

## 1 LE VAUCLUSE

Les coupes énoncées dans ce paragraphe sont localisées Figure 2-1, p. 46.

C'est l'étude des séries de la montagne de Lure et du plateau d'Albion qui a permis à F. Leenhardt (Leenhardt, 1883) et à W. Kilian (Kilian, 1888) d'observer la transition des calcaires urgoniens aux séries vocontiennes. La détermination de la macrofaune contenue dans les séries marneuses du bassin Voncontien a, par corrélation, permis l'attribution des âges barrémien et aptien aux séries calcaires. J. Goguel confirmera ces datations par ses travaux sur les Monts de Vaucluse (Goguel, 1932). Seule la limite Barrémien-Aptien sera remise en question par F. Rivier en 1960 qui la confondra avec un horizon marneux : « l'horizon de la Croc ». Six ans plus tard, la limite est redéfinie par R. Busnardo et G. Foury qui redonnent raison aux premières conclusions de W. Kilian (Busnardo *et al.*, 1966). En revanche, ils datent de l'Hauterivien les calcaires de la zone centrale de la Montagne de Lure attribués au Barrémien par W. Kilian. En 1972, G. Foury datera du Barrémien supérieur une grande partie des calcaires de la montagne de Bluye (située légèrement au nord-est du Mont Ventoux) que F. Leenhardt avait attribué au Bédoulien. Les faunes (macro et micro) déterminées lors de sa thèse par J.P. Masse (Masse, 1976) viendront confirmer la plupart des datations des séries de cette région. Il précisera néanmoins l'âge bédoulien du sommet des calcaires à silex de la série de Chateamar-Lampourdier (situé au nord de Châteauneuf du Pape) que D. Faure avait daté du Barrémien supérieur (Faure, 1965).

F. Leenhardt divisa la série calcaire du Ventoux en trois unités : U1 (calcaire inférieur), U2 (calcaires à *Requienia*) et U3 (calcaires supérieurs) (Leenhardt, 1883). Dans le secteur oriental des Monts de Vaucluse, W. Kilian démontra la corrélation des calcaires à rudistes de Simiane avec les calcaires à silex de la montagne de Lure, leur attribuant ainsi un âge aptien (Kilian, 1888). J. Goguel précisera par la suite la présence de calcaire à débris en dessous et au dessus des calcaires à rudistes et positionne la limite Barrémien-Bédoulien à la base de ces derniers (Goguel, 1932). F. Rivier attribuera 30 ans plus tard l'âge barrémien au calcaire à rudistes de Simiane alors que ceux du secteur de Rustrel reste attribué à l'Aptien (Rivier, 1960).

J. Goguel avait également étudié les calcaires à rudistes de Brouville – La Croizat (localisés légèrement au nord-ouest de Simiane). Il les situa dans le Barrémien, sous les « calcaires à débris inférieurs » contrairement à Leenhardt qui les avaient attribués à l'Aptien. F. Rivier, en accord avec la détermination de J. Goguel, attribua donc au Barrémien la majorité de la série de

la Grande Montagne au nord de Rustrel. Cette théorie fut également adoptée par J.J. Blanc en 1969 (Blanc, 1969).

Durant sa thèse, J.P. Masse démontra qu'en allant vers le nord, les calcaires à rudistes de Simiane (terme U2 sensu Leenhardt) passent latéralement à des calcaires à coraux à la base desquels un niveau marneux de plus en plus développé apparaît (Masse, 1976). Cet horizon marneux se raccorde cartographiquement à l'« horizon de la Croc », limite Barrémien/Aptien pour F. Rivier. Sous cet horizon, P. Weydert observa, dans les avens, des calcaires à silex (terme U1) (Weydert, 1965). A sa base, J.P. Masse récolta des faunes de la limite Barrémien terminal/Bédoulien basal et en suivant ce niveau il s'aperçut qu'il disparaît dans le terme U1. Il en conclut, comme F. Rivier en 1960, que la limite Barrémien/Aptien se situe à la base de l'« horizon de la Croc », dans le terme U1. Il attribue donc au calcaire à rudistes de Simiane (U2) et aux calcaires sus-jacents (U3) un âge bédoulien, en accord avec les premières interprétations de W. Kilian en 1888.

Sur le plateau d'Albion, au nord-ouest de Simiane, la série de Sault est isolée par de nombreux accidents qui empêchent sa corrélation directe avec les séries voisines bien datées. A Sault, F. Leenhardt décrit une couche marneuse qu'il nomma « couche c » au dessus d'un niveau calcaire que J. Goguel a par la suite interprété comme étant l'équivalent des calcaires à silex barrémiens de la Montagne de Lure (Leenhardt, 1883 et Goguel, 1932). Au dessus de ce niveau marneux, des calcaires à coraux sont présents dans lesquels aucune faune permettant une datation n'a été trouvée. Par contre, au nord-ouest de Sault, J.P. Masse observa les mêmes calcaires à coraux sur un niveau marneux dans lequel il reconnut la faune du Barrémien terminal-Aptien basal (Masse, 1976). Il en conclut que le récif de Sault est d'âge bédoulien et que la « couche c » de Leenhardt est l'équivalent de l'« horizon de la Croc » dont la base est interprétée comme la limite Barremien/Aptien. Cette hypothèse est en accord avec celle avancée par J. Goguel en 1932 et par F. Rivier en 1960.

Vers le sud, les termes U1 et U2 de la série de Simiane s'épaississent vers Rustrel en conservant globalement les mêmes lithologies. En revanche, les calcaires à silex de la base du terme U3 à Simiane passent latéralement à des calcaires bioclastiques surmontés par des calcaires à coraux à Rustrel. Au sommet du terme U3 les calcaires bioclastiques observés à Simiane comme à Rustrel ne sont plus visibles à Apt où des calcaires crayeux à coraux et à quelques rudistes sont visibles. Cette différence de lithologie conduit J.P. Masse à considérer le sommet de la série d'Apt

comme le « passage U3 à U2 » (Masse, 1976, p.29).

En 1883, F. Leenhardt démontra également la corrélation entre les calcaires urgoniens (U1, U2 et U3) du Ventoux et les « Calcaires de Vaison » datés de l'Aptien inférieur. Il note néanmoins que le terme U1 peut prendre naissance dans le Barrémien. En 1932 et 1960 J. Goguel et F. Rivier confirmeront pour l'essentiel ces hypothèses stratigraphiques en précisant la position de la limite Barrémien/Aptien dans le terme U1. En 1965, d'après ses travaux sur les séries du Rissas, de Vaison et de Brantes, J.C. Fahy proposera un âge barrémien pour les termes U1 et U2, hypothèse reprise par J. Maillard la même année. Les travaux de G. Foury dans le synclinal de Veaux permettront de démontrer que le sommet du terme U1 est bel et bien Bédoulien (G. Foury, 1972).

Depuis le flanc nord du Mont Ventoux vers les gorges de la Nesque au sud, J.P. Masse observa l'intercalation de plus en plus de niveaux marneux dans les calcaires à silex de la base du terme U1. Dans les premiers niveaux marneux, il décrit une faune barrémienne, en accord avec les déterminations de F. Rivier dans ce même secteur. Dans les niveaux marneux supérieurs, il recueillit plusieurs espèces de *Deshayesites* et attribua un âge aptien au sommet de la partie inférieure du terme U1. Sur le flanc sud-ouest du Mont-Ventoux, où les calcaires bioclastiques du sommet de la formation U1 s'épaississent, il décrit un niveau marneux qui apparaît 10 mètres sous les premiers madrépores de la formation U2. Il fit correspondre ce niveau marneux avec la « couche c » de F. Leenhardt qui n'est donc plus corrélée au niveau marneux qui se trouve sous les calcaires à coraux de Sault. Il s'écarte ainsi du schéma stratigraphique proposé par J. Goguel, J.C. Fahy et J. Maillard et retourne aux hypothèses avancées par F. Leenhardt en 1883.

Dans les gorges de la Nesque, la partie avale est attribuée aux termes U2 et U3 et datée de l'Aptien. Seule la datation de sa partie amont, correspondant au terme U1, a fait l'objet de polémiques. F. Leenhardt situait dans l'Aptien la totalité des couches se trouvant sous le terme U2 (Leenhardt, 1883) ; J. Goguel, dans le Barrémien supérieur et moyen (Goguel, 1932), et J.C. Fahy dans le Barrémien inférieur (Fahy, 1965). Après une étude détaillée des séries de la Nesque et du Rocher de Cire, J.P. Masse (Masse, 1976) attribue à la base du terme U1 un âge barrémien supérieur. Il précise que l'ammonite *Paracrioceras barremense* (= *Emericiceras barremense*) recueillie par J.C. Fahy n'indique pas le Barrémien inférieur mais le Barrémien supérieur. Dans la partie supérieure du terme U1, les calcaires bioclastiques du Mont Ventoux ont laissé la place à des calcaires à madrépores qui eux mêmes passent latéralement à des calcaires à rudistes dans



lesquels la « couche c » de Leenhardt n'est plus visible.

Depuis Saint-Gens jusqu'à Lagnes, la falaise à l'ouest des Monts de Vaucluse offre l'observation d'une puissante série urgonienne. J. Goguel avait attribué la base de cette série au Barrémien moyen, et son sommet à l'Aptien inférieur (Goguel, 1932). 40 ans plus tard, J.P. Masse étudia en détail cette série. Légèrement au sud de Saint Gens, il décrivit une succession de calcaires fins plus ou moins argileux qu'il attribua principalement au Barrémien inférieur. Il fit correspondre à la série de Fontaine de Vaucluse le terme U1 qu'il data du Barrémien supérieur. Au sommet de cette série, il détermina une microfaune qui semble indiquer la base du Bédoulien. Les séries situées au sud de Fontaine de Vaucluse correspondent alors aux termes U2 et U3 et J.P. Masse leur attribua un âge bédoulien.

En conclusion, les calcaires urgoniens des Monts de Vaucluse et du Ventoux sont principalement attribués au Bédoulien. Seul le terme U1, intégralement bédoulien au nord, intègre à sa base une assise Barrémien supérieur vers le sud.

Ce schéma stratigraphique a été repris par P. Léonide lors de ses travaux sur les séries des Monts de Vaucluse. Dans le rapport relatif à cette étude, il souligne, entre autres, la réduction du terme U2 dans le secteur de Rustrel (Léonide *et al.* 2008).

Plus récemment, ce sont les paramètres pétrophysiques de l'Urgonien des Monts de Vaucluse ainsi que leurs répartitions qui ont principalement donné lieu à des publications (Léonide *et al.* 2012 ; Borgomano *et al.*, 2012 ; etc)



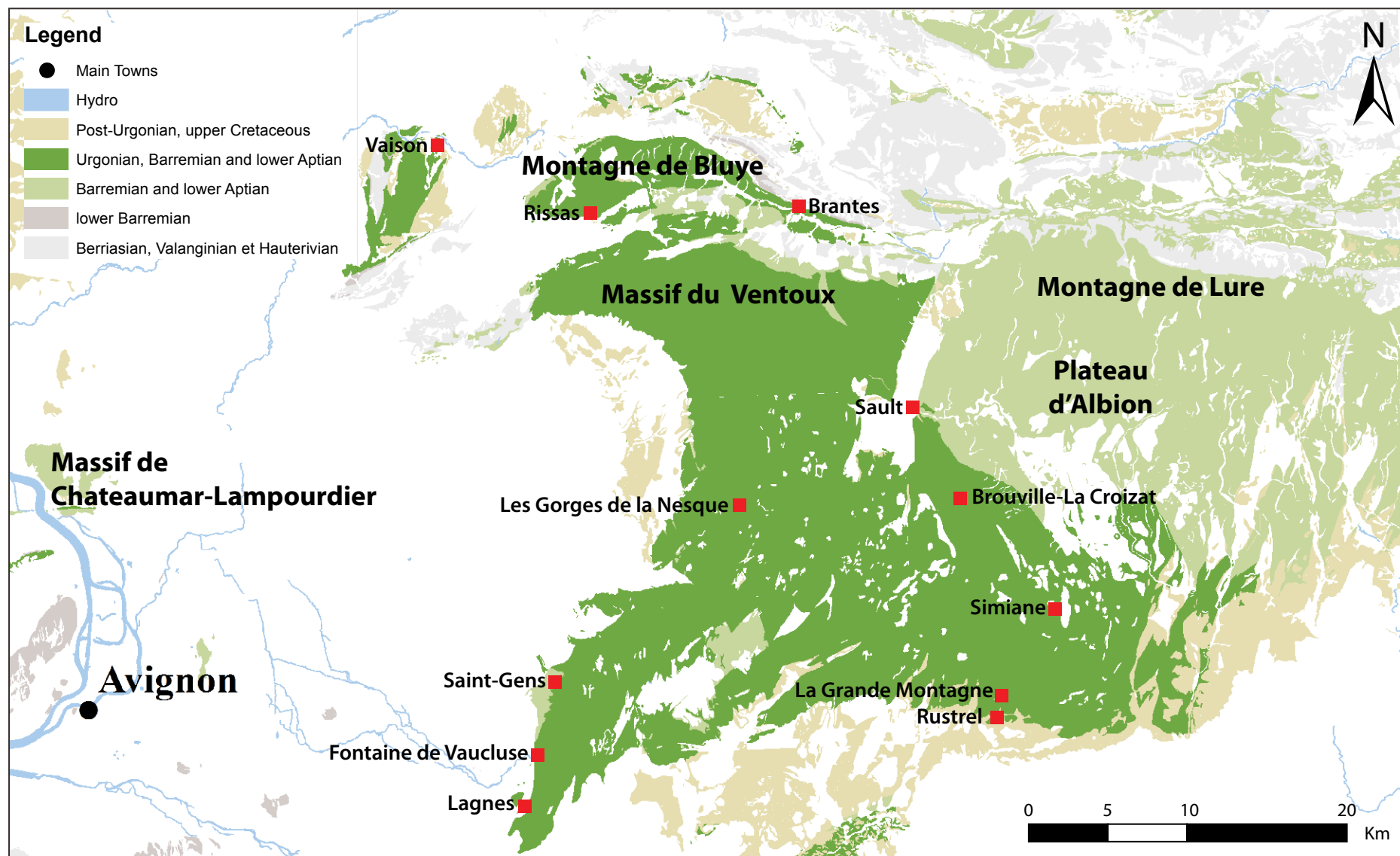


Figure 2-1 : Carte de la région du Vaucluse et localisation des principales séries étudiées

## 2 LA MOYENNE PROVENCE

Les coupes énoncées dans ce paragraphe sont localisées Figure 2-2, p. 50.

L'Urgonien du Luberon fut d'abord étudié par J. Goguel qui attribua à l'ensemble de la série calcaire de cette région un âge barrémien (Goguel, 1932). J.P. Masse mena par la suite une étude qui permit de dater de manière plus précise cette série (Masse, 1976). A Robion, il distingua à la base de la série une unité de calcaire fin, dont la détermination de la faune et la microfaune lui permit de lui attribuer un âge barrémien inférieur. La base bioclastique de l'unité sus-jacente est également attribuée au Barrémien inférieur, alors que son sommet, intégrant plusieurs niveaux bioconstruits, renferme des faunes du Barrémien supérieur. Au dessus, les premiers calcaires à rudistes (Urgonien s.s) sont datés du Barrémien supérieur. Il en est de même pour les biocalcarénites et les calcaires à silex sus-jacents. Au-dessus, un deuxième niveau à rudistes contenant une microfaune aptienne apparaît.

Vers l'est, dans la combe de Bonnieux, ainsi que dans le sondage du Rocher des Abeilles, la série de Robion est retrouvée, mais tronquée de son sommet. J.P. Masse explique cette lacune par un phénomène d'érosion médio-crétacé. Encore plus à l'est, la série de Volx fut également étudiée mais les nombreux accidents qui l'entourent compliquent l'interprétation stratigraphique de ce secteur. Même si la datation de la base de cette série reste floue, il est certain que son sommet a également été tronqué.

En revanche, vers l'ouest, dans la série de Cavaillon, les deux niveaux à rudistes de la série de Robion sont représentés, séparés par des biocalcarénites. Après avoir déterminé la faune et la microfaune de ces niveaux, J.P. Masse attribua le premier niveau à rudistes ainsi que les biocalcarénites au Barrémien supérieur et le deuxième niveau à rudistes au Bédoulien.

La série d'Orgon est la série représentative du massif des Alpilles. P. Matheron fut le premier à décrire cette série (Matheron, 1839 et 1842). Il distingua une formation calcéro-marneuse qu'il attribua au Kimmeridgien, et une formation calcaire à nombreux rudistes qu'il data du Portlandien. En 1843, M. de Serre approuve ces datations (de Serre, 1843).

Au milieu du IX<sup>e</sup> siècle, A. d'Orbigny avance un âge crétacé de cette série de laquelle il fait le strato-type de l'étage Urgonien qu'il crée (d'Orbigny, 1847-1849). Après une première interprétation stratigraphique en 1882, A. Torcapel, en 1895, place les marno-calcaires dans le

« Barutélien » (Barrémien inférieur) et les calcaires d'Orgon dans le « Donzérien » (Barrémien supérieur-Bédoulien) (Torcapel, 1882, 1895). L'année suivante, F. Leenhardt corrèle la série d'Orgon à celle du Ventoux, datant implicitement la majorité des calcaires d'Orgon de l'Aptien inférieur (Leenhardt, 1883). Une description biostratigraphique équivalente est réalisée par L. Carez (Carez, 1883). En 1895, W. Kilian, grâce à la découverte de *Desmoceras charrieri* d'Orb dans les assises de l'Urgonien d'Orgon par A. Curet, conclut qu'une partie au moins des calcaires d'Orgon est datée du Barrémien supérieur (Kilian, 1895). La comparaison qu'E. Pellat fait entre les calcaires urgoniens de Brouzet, dans le Gard, et ceux d'Orgon le conduit à attribuer aux calcaires à rudistes d'Orgon un âge barrémien supérieur-Bédoulien (Pellat, 1903). Jusqu'en 1932, cette attribution stratigraphique est partagée (Paquier, 1930 ; Pellat *et al.*, 1907 ; Douvillé, 1918 ; Goguel, 1932). Ce n'est qu'en 1944 que J. Goguel attribue au Barrémien supérieur l'ensemble des calcaires à rudistes d'Orgon, à l'Hauterivien les marno-calcaires et au Barrémien les calcaires à silex de la base de la série (Goguel, 1944). F. Douvillé adopte par la suite ce schéma (Douvillé, 1947). Des précisions seront ensuite apportées sur la datation des couches sous-jacentes aux calcaires urgoniens (Faure, 1965 et Masse, 1966). En 1976, J.P. Masse suppose un âge bédoulien pour le sommet des calcaires à rudistes.

Légèrement à l'ouest d'Orgon, tout comme G. Foury, J.P. Masse nota la disparition des calcaires à rudistes ainsi que celle, progressive, des biocalcarénites sous-jacentes (Masse, 1976). Dans les biocalcarénites restantes, J.P. Masse détermina des faunes du Valanginien terminal – Hauterivien basal. La disparition des couches barrémiennes sont pour lui le résultat de phénomènes d'érosion médio-crétacés. Il avança les mêmes interprétations pour la série de la Montagnette, située encore plus à l'ouest, vers Tarascon, dans laquelle il ne retrouva que les niveaux de l'Hauterivien terminal et du Barrémien basal.

Sur la rive gauche de la Durance, entre Orgon et Pertuis, quelques affleurements de type urgoniens avaient été signalés (Collot, 1889 ; Gouvernet, 1963). J.P. Masse indique en 1976 que ces affleurements ne correspondent qu'à la partie basale de la série d'Orgon appartenant à l'Hauterivien et au Barrémien inférieur. J.P. Masse en vint à la conclusion que les calcaires urgoniens barrémien et peut être même aptiens ont été érodés durant la période médio-crétacé dans ce secteur également (Masse, 1976).

Dans le chaînon de la Fare-Lancon, P. Matheron fut le premier à observer des « calcaires à chama » près de Coudoux (Matheron, 1839). En 1889, M. Collot en décrivit également à cinq

kilomètres à l'est de Saint-Chamas (au nord de l'Etang de Berre), que G. Denizot, en 1934 attribua au Barrémien (Denizot, 1934). Par la suite, ces attributions seront remises en question par les travaux de R. Busnardo (Busnardo, 1970) et de J.P. Thieuloy (Thieuloy, 1974) qui réattribueront aux faunes utilisées par G. Denizot d'autres biozones. Avant cela, en 1965, J.P. Masse et J.J. Blanc attribuèrent aux marnes inférieures un âge Hauterivien, aux calcaires urgoniens un âge barrémien et un âge bédoulien aux calcaires argileux à Céphalopodes et Echinides ainsi qu'aux calcaires à rudistes sus-jacents (Masse *et al.* 1965).

Deux ans plus tard, A. Pachoud s'accorda avec ces datations et décrivit, sous les marnes hauteriviennes, une formation de calcaires urgoniens reposant sur des marno-calcaires. Sous ces deux niveaux qu'il data de l'Hauterivien, il observa un troisième niveau calcaire qu'il attribua au Valanginien (Pachoud, 1967).

En 1976, dans le cadre de sa thèse, J.P. Masse décrivit précisément cette série et distingua deux formations calcaires intercalées de niveaux marneux. En accord avec A. Pachoud, il attribua la première formation au Valanginien et la deuxième à l'Hauterivien. Il observa, en plus, une troisième formation calcaire au dessus des deux premières à la base de laquelle il situa le passage Hauterivien-Barrémien. Les calcaires bioclastiques sus-jacents sont alors attribués au Barrémien inférieur. Enfin, les calcaires à rudistes, les calcaires à coraux et les biocalcarénites sommitales sont datés du Barrémien supérieur. La faune du niveau marneux qui est au dessus de cette dernière formation est bédoulienne. Un dernier niveau de calcaire urgonien y est superposé, principalement composé de rudistes que J.P. Masse data également du Bédoulien. Latéralement, ce dernier niveau bédoulien n'est plus retrouvé. A l'est de Calissanne, la formation urgonienne barrémienne est également tronquée. Comme pour les séries des Alpilles et du Luberon, J.P. Masse explique ces lacunes par des phénomènes d'érosion médio-crétacé.

En conclusion, la Moyenne-Provence voit sa série débiter dès le Valanginien terminal par des calcaires bioclastiques qui apparaissent de nouveau dans l'Hauterivien inférieur et dans le Barrémien inférieur. Les calcaires à rudistes sont principalement observés dans le Barrémien moyen et supérieur, plus rarement dans le Bédoulien. Le sommet des séries de la Moyenne-Provence sont marqués par des phénomènes d'érosion médio-crétacés. J.P. Masse émet l'hypothèse de dépôts de calcaires urgoniens d'âge bédoulien dans toute la Provence moyenne qui auraient par la suite été érodés lors des émergences éocéniques. Il explique les variations d'épaisseurs de séries érodées par la présence d'un « anticlinal médian-principal » dont il situe l'axe près des chaînons ou massifs riverains de la Durance (Masse *et al.*, 1976).



Figure 2-2 : Carte de la Moyenne Provence et localisation des principales coupes étudiées

### 3 LA BASSE PROVENCE

Les coupes énoncées dans ce paragraphe sont localisées Figure 2-3, p. 54.

P. Materon fut le premier à décrire les calcaires à « Chama ammonia » de la région de Marseille. Il les attribua d'abord au Jurassique (Materon, 1839) avant de les dater du Crétacé en 1842 (Materon, 1842). P. Reynès data par la suite les calcaires argileux, superposés aux calcaires à « Chama ammonia », de l'Aptien. En 1864, les travaux de H. Coquand à La Bédoule, dans le massif de la Sainte-Baume ainsi qu'en Aragon le conduiront à assimiler l'Urgonien à l'Aptien (Coquand, 1864). Dans le Valanginien distingué par H. Coquand en 1868, L. Collot décrit une partie inférieure marneuse et verdâtre (les « marnes vertes ») et une partie supérieure calcaire. Au dessus, les marno-calcaires sont attribués au Néocomien dans lequel est repéré l'Urgonien, nettement séparé de l'Aptien (Collot, 1889). En 1934, G. Denizot sépare le « calcaire blanc inférieur » qu'il attribue au Portlandien, du « calcaire blanc supérieur » qu'il assimile au Valanginien. Dans l'Hauterivien, il distingue la « marne inférieure » (Hauterivien inférieur), la « barre à silex » (Hauterivien moyen) et la « marne supérieure » (Hauterivien supérieur). Enfin il distingue les calcaires « infraurgoniens », qui se situent entre les marnes hauteriviennes et les calcaires « urgoniens », de ces derniers, à rudistes, qu'il limite au Barrémien. En effet, il met en évidence la présence de l'« horizon à Hétérocéras » au sommet des calcaires urgoniens qui lui délivre une faune barrémienne.

En 1971 et 1975, des précisions stratigraphiques seront apportées : les « marnes vertes » sont attribuées au Berriasien (Valanginien basal ?), « les marnes inférieures » au Valanginien supérieur et les « calcaires blancs supérieurs » au Valanginien inférieur (Babinot *et al.*, 1971).

Dans le chaînon de la Nerthe, J.P. Masse étudia deux nouvelles séries dans lesquelles il rencontra les niveaux allant des marnes inférieures (Valanginien supérieur) aux calcaires urgoniens à rudistes datés du Barrémien supérieur, surmontés ici par des calcaires argileux à silex qu'il attribua au Bédoulien. Il plaça la limite Hauterivien-Barrémien dans les biocalcarénites qui se situent sous les coraux de la base de la série urgonienne. La limite Barrémien inférieur-Barrémien supérieur est située au sein même des calcaires à rudistes (Masse, 1976).

Dans la région de Fos-sur-mer, seules des biomicrites et des biosparites fines péloïdales datées par J.P. Masse de l'Hauterivien moyen à supérieur affleurent. Différents sondages ont révélé la présence de calcaires crayeux à rudistes dont la microfaune déterminées par J.P. Masse

a permis de lui attribuer un âge barrémien supérieur.

De la région de Marseille, P. Matheron en 1842, P. Reynès en 1861, E. Fournier en 1890 et 1895, L. Collot en 1889, G. Denizot en 1934, R.P. Charles en 1946,47 et 48, G. Gieu en 1963 et 1966, D. Guieu et J.P. Masse en 1975 et 76 ont décrit et stratigraphiquement interprété l'Hauterivien. La plupart de ces auteurs, ainsi que J.J. Blanc en 1965 en ont également étudié le Barrémien. Mais, c'est l'Aptien de la Bédoule et son raccordement avec les calcaires urgoniens sous-jacents qui ont suscité le plus de travaux.

Dans un premier temps, les calcaires argileux à ammonites de l'Aptien ont clairement été séparés des calcaires à rudistes (Reynès, 1861 et Hebert, 1871 et 1872), malgré l'observation d'intercalations de calcaires à rudistes dans les calcaires argileux faite par A. Coquand en 1864 (Coquand, 1864). A. Toucas fit la même observation 24 ans plus tard et plaça la limite Barrémien-Aptien au sein des calcaires à Céphalopodes (Toucas, 1888). E. Roch proposa de la placer à la base de ces calcaires (Roch, 1927) avant que G. Denizot, par l'étude des céphalopodes de cette série prouve l'âge barrémien terminal de la base des calcaires à ammonites. Cette attribution a été retenue et argumentée par les travaux futurs (Fabre-Taxy, 1965 ; Masse *et al.* 1975).

Durant sa thèse, J.P. Masse étudia en détail une coupe sur le massif de Marseillevyre, et une dans le massif du Puget (Masse, 1976). Dans la coupe de Marseillevyre, la même succession est retrouvée depuis la « marne inférieure hauterivienne » qu'il attribua au Valanginien et dans laquelle il plaça la limite Valanginien-Hauterivien, jusqu'à la base des calcaires urgoniens, qu'il data du Barrémien inférieur (Thieuloy, 1974 et Gervais, 1974), Masse, 1976).

La base de la série du massif du Puget recoupe celle de Marseillevyre. Au dessus, dans l'unité de Port-Miou, caractérisée par le développement important des rudistes, J.P. Masse plaça la limite Barrémien inférieur - Barrémien supérieur. L'unité des calcaires à coprolites sus-jacentes a également été attribuée au Barrémien supérieur. La limite Barrémien/Aptien fut localisée dans l'unité des calcaires micritiques, surmontée par une dernière unité de calcaires argileux qui renferme une faune aptienne (Masse, 1976).

Latéralement, certaines variations ont été observées en ce qui concerne la « marne inférieure », les « calcaires à silex » ou la « marne supérieure » (Denizot, 1937 ; Guieu 1961, 1963-1964 et 1966-1968 et Guieu 1963). Tout comme G. Guieu, J.P. Masse observa en certains secteurs du massif de l'Etoile qu'une partie de ce qui est attribué à l'Hauterivien marno-calcaire passe



latéralement à des formations dolomitiques. Les calcaires à rudistes ainsi que les biocalcarénites attribuées à l'Hauterivien sont eux aussi souvent dolomitisés.

G. Guieu avait décrit trois séries différentes dans le massif de la Sainte-Baume (Guieu, 1968). La série la plus septentrionale est la plus tronquée et ne présente que le Berriasien et le Valanginien calcaire. Les deux autres séries (une normale et une renversée) sont quasi identiques à la série de Marseille (Corroy, 1939 et Guieu, 1968). G. Corroy et plus tard G. Denizot dataient les calcaires urgoniens de Nans du Valanginien, qui étaient considérés discordants du Gargasien sus-jacent (Corroy, 1939 et Denizot, 1952). En 1966, C. Cornet proposa un âge Barrémo-Bédoulien à cette formation urgonienne (Cornet, 1966).

En 1976, J.P. Masse étudia à son tour la série de Nans et nota la présence d'un niveau à *Palorbitolina lenticularis* entre les calcaires urgoniens et les calcaires argileux bédouliens. Il n'existerait donc pas d'Urgonien bédoulien comme le croyait C. Cornet. Il souligna également que les calcaires urgoniens, autant ceux datés de l'Hauterivien que ceux datés du Barrémien présentent une épaisseur plus faible à la Sainte Baume que dans les calanques de Marseille.

En conclusion, dans la région de la Basse-Provence, des calcaires bioclastiques et à madrépores (Urgonien s.l.) se développent dès l'Hauterivien inférieur, et dans le Barrémien basal dans le chaînon de la Nerthe. Les faciès à rudistes (Urgonien s.s.) se développent dès le Valanginien inférieur. Il réapparaissent à l'Hauterivien supérieur et se développent pendant la quasi totalité du Barrémien.

Les calcaires urgoniens s'interrompent au Barrémien terminal dont les derniers niveaux sont caractérisés par des faciès à Céphalopodes.

J.P. Masse, seul ou en collaboration avec d'autres auteurs (M. Fenerci, E. Morycowa, A. Chartrousse...), contribue toujours à apporter des précisions sur la faune urgonienne, principalement sur les rudistes, des Monts de Vaucluse et de Provence (Masse, 1992, 1993 et 1995 ; Masse *et al.* 1998, 2006, 2008, 2009, 2011 et 2013).



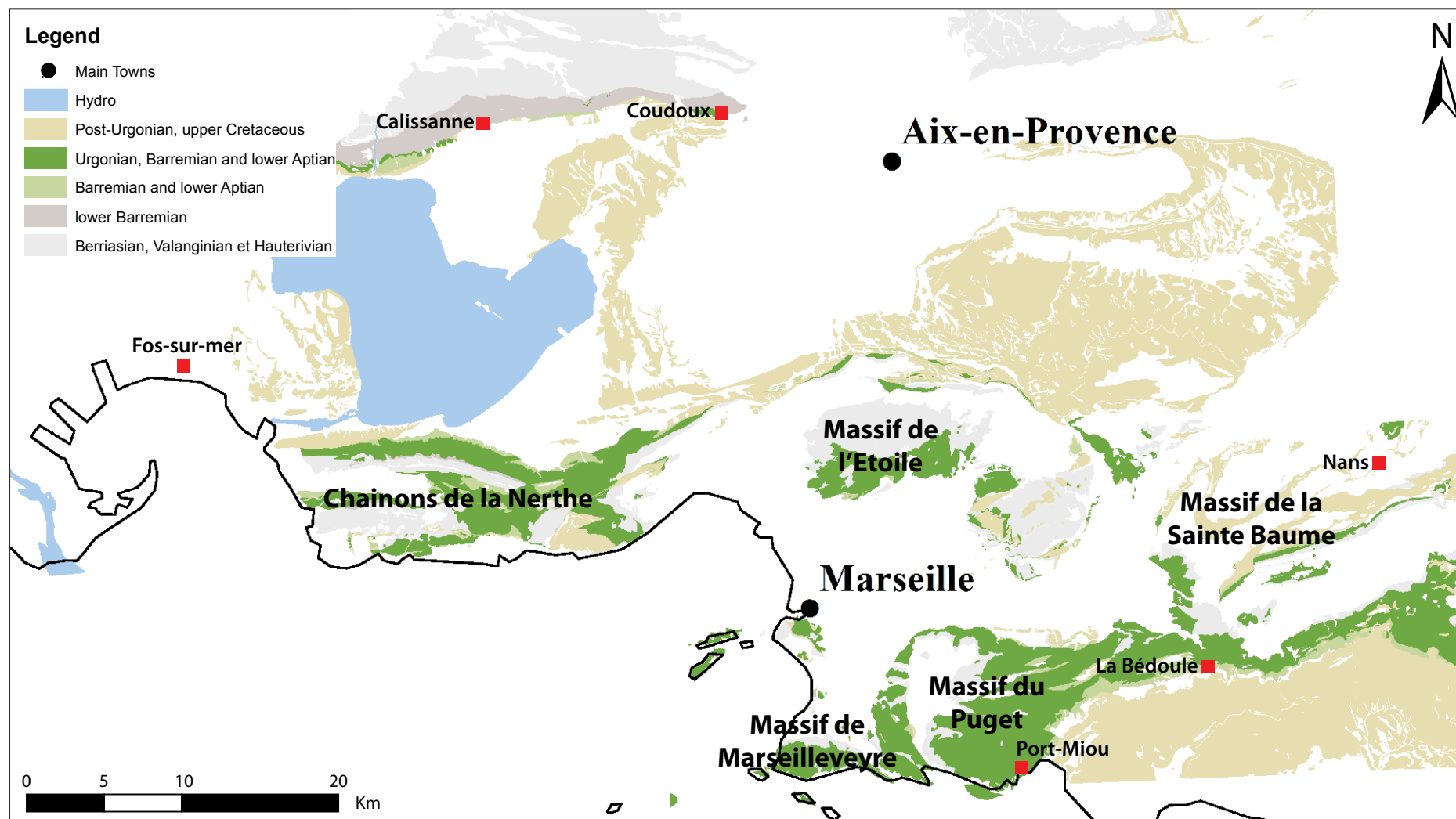


Figure 2-3 : Carte de la basse Provence, et localisation des principales coupes étudiées.

## 4 LE VERCORS

C. Lory fut le premier à s'intéresser à l'attribution stratigraphique des calcaires à rudistes du Vercors. Dans sa thèse, où il parle de « calcaires à Chama », il proposa d'abord de les dater du Néocomien inférieur (Lory, 1846) avant d'attribuer dans ces travaux futurs, aux mêmes calcaires devenus « calcaires à Caprotines », un âge Néocomien supérieur (Lory, 1861).

Dès 1852, deux couches riches en Orbitolinidés sont décrites : l'une subdivisant les « calcaires à Caprotines » dans sa partie supérieure et l'autre les surplombant (Lory, 1852 et Gras, 1852). En 1861, C. Lory attribua à cette deuxième couche à Orbitolines un âge aptien grâce à la détermination des fossiles tels qu'*Ammonites martini* d'Orbigny et *Belemites semicanaliculatus* BLAINVILLE. Cette attribution sera ensuite confortée par les travaux de V. Paquier qui récolta *Crioceras mojsisovicsi* dans l'équivalent latéral des calcaires à rudistes dans la région de Plan-de-Baix.

Le problème des corrélations des séries calcaires du Vercors avec les séries du bassin vocontien fut soulevé dès 1861. C. Lory jugea d'abord absents les niveaux du Néocomien supérieur dans la zone vocontienne où les calcaires à *Criocères* et *Ancylocères* (Néocomien inférieur) se trouvent juste sous les marnes aptiennes. Toutefois, l'alternance des lumachelles à Orbitolines et des couches à *Ancylocères* et *Scaphites yvani* (Néocomien supérieur) dans la Cluse de Crupies amenait à réfléchir aux correspondances des niveaux de plateformes avec ceux présents dans le bassin (Lory, 1861). F. Leenhardt et W. Kilian démontrèrent vingt ans plus tard la corrélation des calcaires à rudistes avec les niveaux barrémiens et aptiens grâce à l'étude des formations du chaînon Ventoux-Lure (Leenhardt, 1883 et Kilian, 1888) (cf. paragraphe 1, p. 42).

W. Kilian porta ensuite ses travaux sur les « calcaires à Caprotines » de la région grenobloise. Il compara les calcaires à spatangues, se trouvant sous les « calcaires à Caprotines », dans lesquels *Hoplites cruasensis* avait été reconnu dans la série du Valentinois renfermant *Hoplites cruasensis*, *Desmoceras cassida*, *Costidiscus recticostatus*, *Pulchellia*, *Holcodiscus*, et *Crioceras mojsisovicsi* alors déterminé par G. Sayn comme Barrémien (Sayn, 1892).

Comme C. Lory, W. Kilian refusa d'employer le terme « Urgonien » comme étage de part sa correspondance avec le Barremien et la base de l'Aptien. Par la suite, les travaux de V. Paquier confirmeront cette correspondance et c'est à partir de 1907 qu'il sera proposé de faire correspondre au terme « Urgonien » un « faciès à calcaire subrécifal hétérochrone englobant en partie

le Barrémien et l'Aptien » (Kilian, 1907 et 1910).

Au cours du xx<sup>e</sup> siècle, l'attribution stratigraphique des calcaires urgoniens du Vercors sera précisée grâce aux travaux de différents auteurs. Elle dépendra surtout des datations et des corrélations des différents niveaux marneux qui divisent la masse urgonienne.

Au début du siècle, V. Paquier considéra les quatre vires marneuses qu'ils avaient rencontrées (intégrant la couche inférieure à Orbitolines) comme correspondant à un seul et même niveau d'âge barrémien supérieur terminal : la « vire à *Hétérocères* ». Il considéra donc l'Urgonien inférieur comme étant d'âge barrémien supérieur et l'Urgonien supérieur d'âge bédoulien (Paquier, 1900).

Seul un différent existait sur la datation de la couche supérieure à Orbitolines entre V. Paquier qui la datait du Bédoulien, voire de la limite Bédoulien-Gargasien, et C. Jacob qui lui attribuait un âge Gargasien (Jacob, 1907).

Ce schéma stratigraphique fut admis pendant près de trente années sans plus amples argumentations. Lors de la révision des cartes géologiques à 1/80 000 du Vercors par J. Goguel en 1935, celui-ci interpréta la couche inférieure à Orbitolines comme étant un niveau marneux stratigraphiquement différent de la « vire à *Hétérocères* ».

Les études réalisées par différents auteurs, notamment dans le cadre du tracé des cartes géologiques à 1/50 000 ne contredirent pas le schéma stratigraphique proposé par V. Paquier et complété par J. Goguel (Thieuloy, 1959 ; Bellamy, 1963 ; Dasarathi, 1965 ; Le Page, 1963 ; Pelin, 1966, et Arnaud, 1965). Par ailleurs, J. P. Thieuloy et J. P. Girod précisèrent l'âge de la couche supérieure à Orbitolines grâce à la découverte de nombreuses ammonites et à la révision de celles conservées dans les collections de l'Institut Dolomieu. Elles sont toujours, depuis lors, considérées d'âge bédoulien terminal (Thieuloy *et al.*, 1964).

En 1976, A. Arnaud-Vanneau, H. Arnaud et J.P. Thieuloy proposent un nouveau schéma stratigraphique des calcaires urgoniens du Vercors (Arnaud-Vanneau *et al.*, 1976 ; Arnaud-Vanneau, 1980 et Arnaud, 1981). Une étude précise des faunes de différents gisements fossilifères leur permet de distinguer des niveaux marneux qu'ils attribuent à différents étages. L'âge barrémien supérieur de la masse inférieure urgonienne est confirmé mais cette dernière se situerait au dessus de la « vire à *Hétérocères* » et non au-dessous. Les vires marneuses corrélées entre elles par V. Paquier se distinguent finalement en quatre vires différentes : Les « marnes

de Fontaine Graillère », attribuées aux Barrémien inférieur, la « vire à *Hétérocères* », la « couche inférieure à Orbitolines », datée du Bédoulien inférieur, et la « couche supérieure à Orbitolines » datées du Bédoulien supérieur. Les calcaires à débris de Borne sont alors distingués des calcaires à débris de Glandasse par les « marnes de Fontaine Graillère ». Au dessus de la « vire à *Hétérocères* », les masses inférieures et supérieures de l'Urgonien sont séparées par la « couche inférieure à Orbitolines » qui renferme une faune bédoulienne. La limite Barrémien-Bédoulien se trouverait donc dans les derniers niveaux de la masse inférieure urgonienne.

Ce schéma stratigraphique est conservé par F. Viéban qui a caractérisé les tendances majeures d'évolution de la plateforme urgonienne et souligne son caractère progradant dans sa thèse (Viéban, 1983).

A la fin des années 1980, début des années 1990, les principes fondamentaux de la stratigraphie séquentielle sont publiés (Vail *et al.*, 1984 ; Posamentier *et al.*, 1988 ; Cramez, 1990 ; Hunt *et al.* 1995). A. Arnaud-Vanneau et H. Arnaud, associés à d'autres auteurs, redéfinirent alors l'architecture des séquences de dépôt, selon ces principes, qu'ils ont précisé au cours des années 1990 (Jacquin *et al.*, 1991 ; Arnaud *et al.* 1989, 1991, 1995 et 1998). Ils définissent ainsi 7 séquences de dépôts de troisième ordre, cinq dans le Barrémien et deux dans l'Aptien. Les deux premières séquences (Ba1 et Ba2), qui appartiennent au Barrémien inférieur, ainsi que le cortège de bas niveau et le cortège transgressif de la troisième séquence (Ba3), forment l'unité des calcaires de Glandasse. La masse inférieure de la formation urgonienne est constituée du cortège de haut niveau de la séquence Ba3 ainsi que des deux dernières séquences du Barrémien (Ba4 et Ba5). La première séquence de l'Aptien (Ap1) est marquée par une chute importante du niveau marin suivie d'un ennoisement rapide de toute la plateforme. C'est dans le cortège transgressif de cette séquence que se situe la « couche inférieure à Orbitolines ». Au dessus de cette dernière est définie la masse supérieure de la formation urgonienne. La deuxième séquence aptienne s'organise de la même manière avec un ennoisement encore plus prononcé au moment duquel se dépose la « couche supérieure à Orbitolines ». Cette dernière marque la fin des calcaires urgoniens (cf. Figure 2-4, p. 59). En 1994, A. Arnaud et E. Carrio-Schaffhauser démontrèrent que la plupart des limites de séquences sont marquées par une histoire diagénétique complexe, souvent polyphasée (Arnaud-Vanneau *et al.*, 1994).

En 1993 et 1998, une répartition stratigraphique des Orbitolinidés de la plateforme urgonienne subalpine et jurassienne au regard de ce découpage séquentiel est présentée (cf.

Figure 2-5, p. 60) (Arnaud *et al.* 1993, 1998).

Il est également nécessaire de présenter les travaux d'autres auteurs qui, d'après leurs propres études sur différents secteurs du Sud-Est de la France, et notamment le Vercors, en sont venus à des conclusions stratigraphiques tout à fait différentes. Ils divisent la plateforme urgonienne en 10 séquences de troisième ordre. Les trois premières sont attribuées à l'Hauterivien supérieur, les cinq suivantes au Barrémien, et les deux dernières à l'Aptien inférieur. Accordé à ce découpage stratigraphique, une répartition des Orbitolinidés bien différente de celle publiée par H. Arnaud *et al.* en 1998 est proposée (Clavel *et al.* 1994, 1995, 1998, 2010 et 2013).

L'écart entre les conclusions des deux équipes (Arnaud *et al.* et Clavel *et al.*) est le résultat d'interprétations différentes à différentes échelles. D'une manière générale, le terme « Urgonien » n'est pas employé pour désigner la (les) même(s) formation(s). Dès 1976, H. Arnaud distingue les « calcaires à débris de Glandasse » des « calcaires urgoniens ». Il considère que ces deux unités ne peuvent appartenir à la même formation puisqu'elles ne sont pas comparables en termes de localisation paléogéographique, de faciès dominant, ou d'âge. En revanche cette distinction n'est pas réalisée par B. Clavel et ses co-auteurs.

Les Orbitolinidés considérés valides pour la datation de l'Urgonien ne sont pas les mêmes pour B. Clavel et ses co-auteurs (Clavel *et al.*, 2010) que pour H. Arnaud et ses co-auteurs (Arnaud *et al.*, 1998, Arnaud, 2005). Les caractères étudiés pour la détermination des lignées évolutives ne sont pas considérés de la même manière par A. Arnaud-Vanneau (Arnaud *et al.* 1988) et par R. Schroeder (Clavel *et al.* 1994). Il en résulte des divergences importantes de détermination. Les déterminations des Ammonites sont également très controversées. L'attribution stratigraphique de certains niveaux dans une même coupe étudiée par les deux équipes s'en trouve très différente.

C'est sur la base du découpage séquentiel et de la répartition des Orbitolinidés proposés par H. Arnaud et ses co-auteurs qu'a été menée l'étude présentée dans cette thèse. Comme il sera présenté dans les chapitres suivants, ils ont permis la réalisation de corrélations cohérentes sur l'ensemble du pourtour des bassins Vocontien et Bédoulien du Sud-Est de la France.

Récemment, la falaise est du Vercors a été étudiée et modélisée par R. Richet (Richet *et al.* 2011)

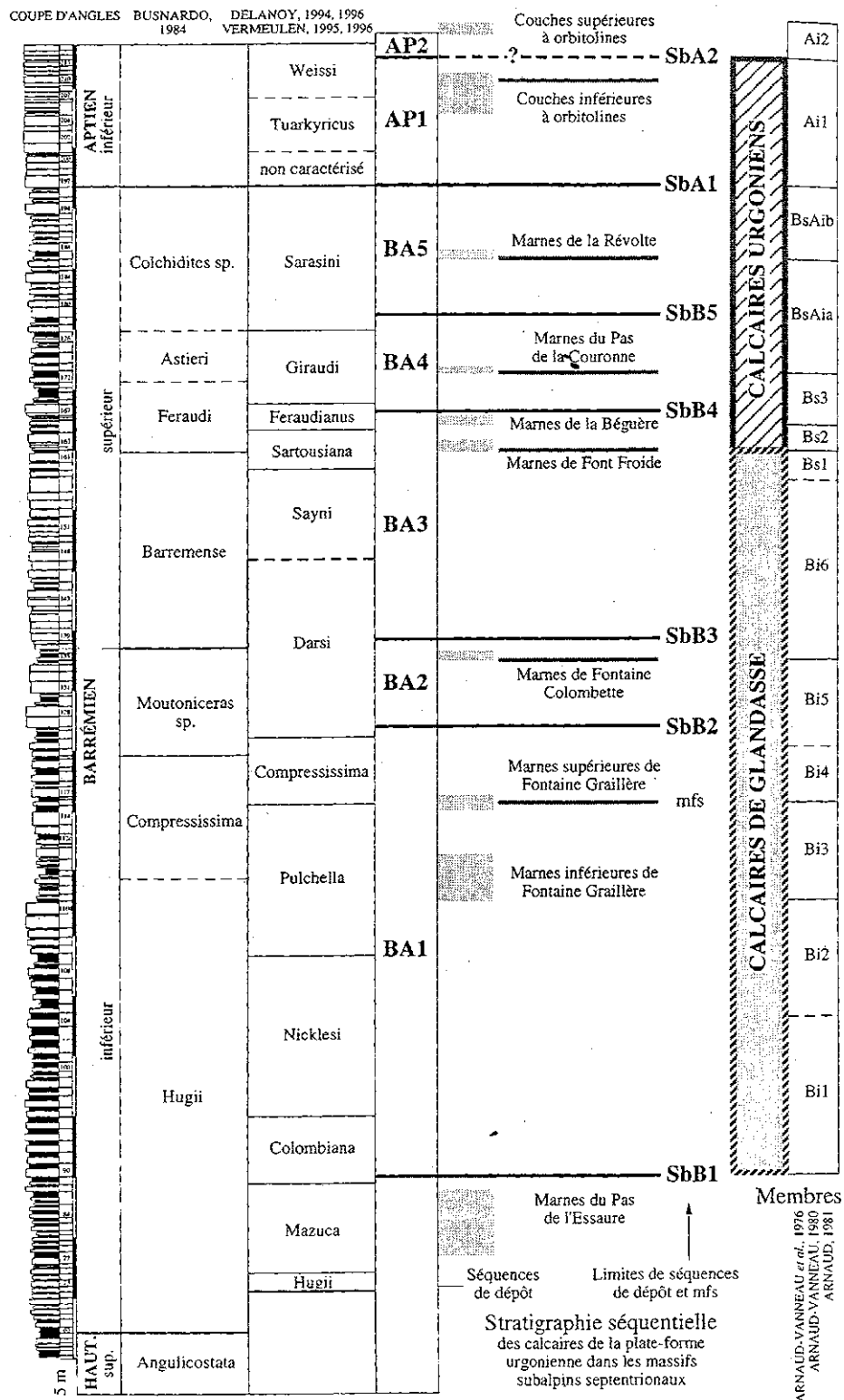


Figure 2-4 : Stratigraphie séquentielle de l'Urgonien du Vercos, répartition stratigraphique des « calcaires de Glandasse » et des « calcaires urgoniens » (Arnaud *et al.*, 1998)



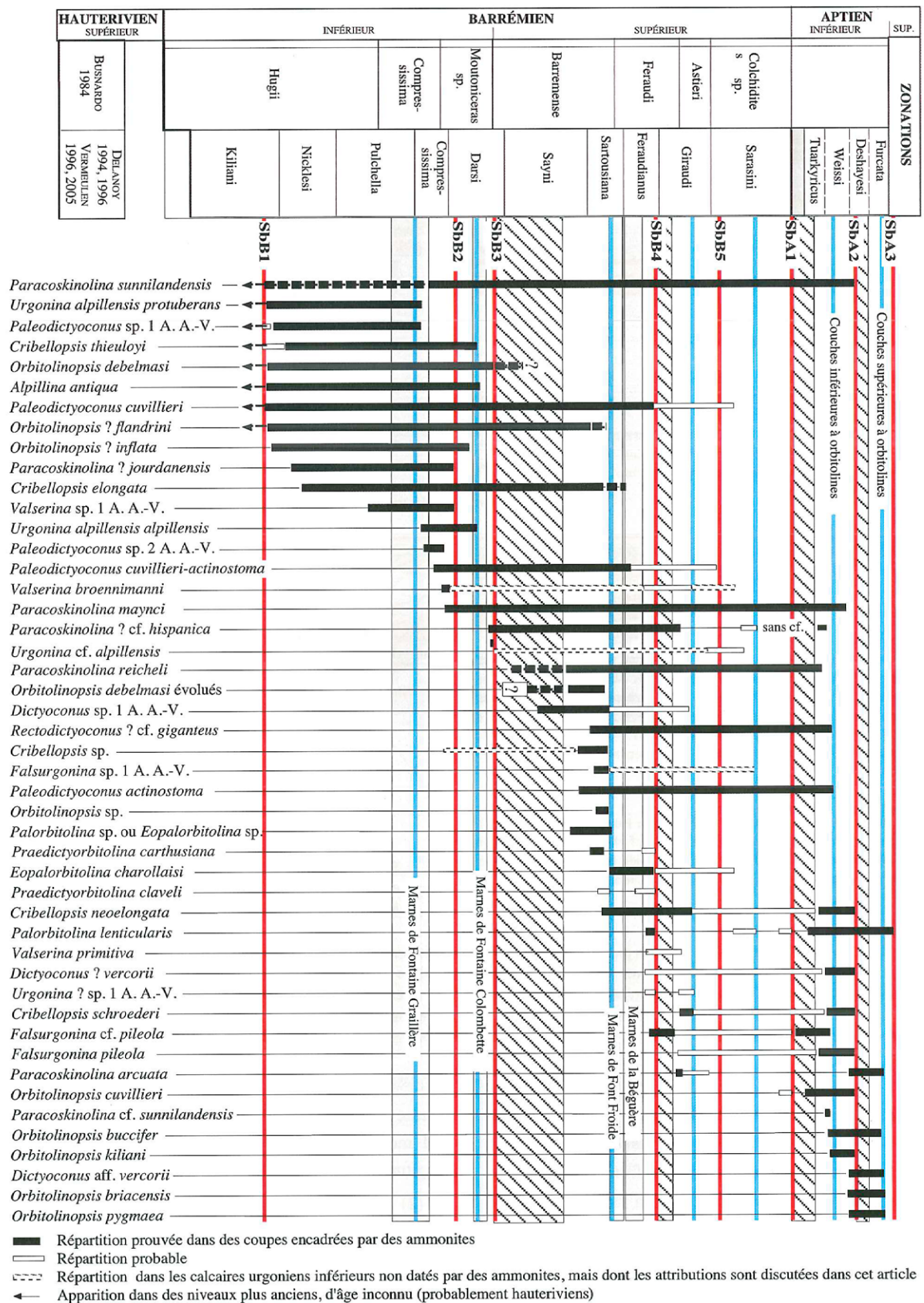


Figure 2-5 : Répartition stratigraphique des Orbitolinidés dans les chaînes subalpines septentrionales (Arnaud *et al.*, 1998)

## 5 L'ARDÈCHE

L'Urgonien de cette région a été étudié dès la fin du ix<sup>e</sup> siècle par L. Carez (Carez, 1882) et par V. Paquier (Paquier, 1896, 1900 et 1903) qui démontrent que l'Urgonien atteint l'Aptien dans la région de Saint Montant. Dans la première partie du xx<sup>e</sup> siècle, plusieurs auteurs s'intéressent aux calcaires à débris associés à l'Urgonien (Roman *et al.*, 1904 ; Kilian, 1912 ; Goguel, 1932 ). C'est J. Maillard qui démontrera que ces calcaires bioclastiques assurent le passage des faciès à rudistes du plateau de Saint-Remèze au faciès hémipélagique de la région de Saint-Thomé (Maillard, 1965).

Une synthèse de ces travaux a été réalisée en 1979 (Cotillon *et al.*, 1979). Cette synthèse montre la similitude d'évolution générale de la série urgonienne entre les régions d'Ardèche, du Vercors, du Dévoluy et de Provence. En effet, il a été démontré sur l'ensemble de ces secteurs que la série urgonienne correspond à une séquence régressive.

A l'occasion de cette synthèse, des cartes paléogéographiques de la région sud-ardéchoise ont pu être dessinées (cf. Figure 2-6, p. 63). Il y apparaît un haut fond au niveau de la Dent-de-Rez et du Serre de Tourre. On parle alors de contrôle tectonique de la sédimentation et de la paléogéographie.

D. Lafarge et C. Contensuzas continueront d'étudier cette région en détail pendant leurs travaux de thèse (Lafarge, 1978 et Contensuzas, 1980). Ils lèveront plusieurs coupes depuis l'Aven d'Orgnac au nord du Gard jusqu'à Cruas, à quelques kilomètres au nord de Montélimard, en rive droite de la vallée du Rhône. L'étude de ces coupes conforte le passage des calcaires urgoniens au faciès hémipélagique vers le nord (Saint Montant). Seules les dernières séquences y présentent des faciès de plateforme, ce qui est cohérent avec le caractère régressif de la plateforme ardéchoise.

Plus récemment, B. Clavel et ses co-auteurs ont publié leurs travaux sur le secteur ardéchois. D'après Clavel *et al.*, 2007, la coupe de Pont de Laval, située sur la route reliant Vallon Pont d'Arc à Saint-Remèze, est composée à sa base de marnes et de calcaires argileux, surmontés par des calcaires bioclastiques intercalés de dépôts hémipélagiques. Cette coupe a été attribuée à l'Hauterivien supérieur et au Barrémien inférieur d'après la détermination d'ammonites, d'oursins, d'orbitolines et d'algues. Toujours d'après Clavel *et al.*, 2007, la coupe de Mas de Gras, située à 5 km au nord-est de la coupe de Pont de Laval, est composée de calcaires bioclastiques inteca-



lés par des dépôts hémipélagiques. La détermination d'Ammonites, d'algues et d'Orbitolinidés ont permis de déterminer la limite Hauterivien / Barrémien à la base de cette coupe et de dater son sommet du Barrémien inférieur.

A partir de l'étude de ces deux coupes situées sur la bordure de la plateforme urgonienne, dont aucune ne présente de calcaire urgonien sensu stricto à rudistes, B. Clavel et ses co-auteurs attribuent l'Urgonien de l'Ardèche au Barrémien inférieur.

Dans une publication plus récente, ses mêmes auteurs corréleront plusieurs coupes de la région ardéchoise et proposent des corrélations (Clavel et al., 2013). Parmi ces coupes, celles de la Montagne de la Serre, des Mouniers (Vallon Pont-d'Arc) et de bois sauvage sont situées à l'ouest de la faille des Cévennes dont les jeux Cénozoïques ont probablement décalé le bloc ouest par rapport au bloc est. Les coupes de Mas de Gras, de Saint Montant et de Viviers sont situées sur la bordure de la plateforme ardéchoise. Par définition, et de par le caractère progradant de la plateforme urgonienne, elles ne peuvent représenter que les faciès de bordure de plateforme (Mas de Gras) ou bien la partie terminale de l'Urgonien de ce secteur (Saint-Montant et Viviers). Enfin, la coupe dite des «Gorges de l'Ardèche», a été échantillonnée au niveau du Serre de Tourre. Il sera démontré dans le chapitre n°4 que cette coupe ne représente que la base de l'Urgonien des Gorges de l'Ardèche dont la coupe complète atteint plus de 600 mètres d'épaisseur. En définitive, les corrélations ainsi que les interprétations sur l'Urgonien de ce secteur sont basées sur des coupes dont on ne connaît pas la position au moment du dépôt de l'Urgonien, et sur des coupes ne représentant que la base (serre de Tourre) ou le sommet (Saint-Montant et Viviers) de la série urgonienne.

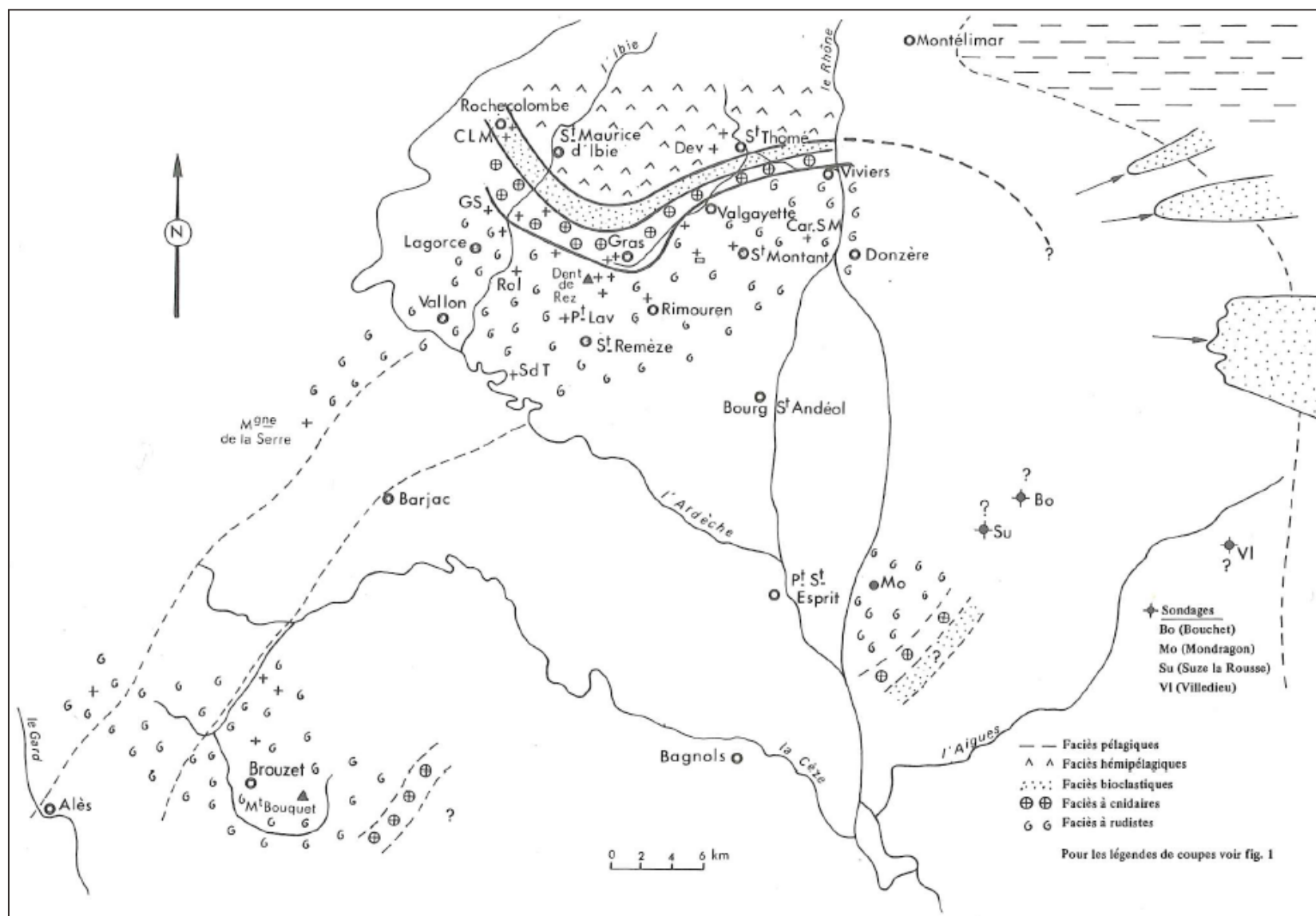


Figure 2-6 : Carte de la région ardéchoise au Barrémien terminal, Cotillon *et al.*, 1979

## 6 LE GARD

En 1882, A. Torcapel fut le premier à s'intéresser à l'Urgonien de la région du Gard (Torcapel, 1882) qu'il attribue déjà au « Donzérien » (Barrémien supérieur – Bédoulien). Cette datation sera confirmée par la suite par de nombreux auteurs. En 1903, E. Pellat décrivit les niveaux valanginiens, hauteriviens et barrémien qu'il observa entre Mons et Brouzet, ainsi que l'Aptien des environs d'Uzès et le Barrémien de la région de Lussan (Pellat, 1903). Ces descriptions furent complétées dans la région de Brouzet, où les rudistes furent soigneusement étudiés (Pellat *et al.*, 1907 et Douvillé H., 1918). En 1916, P. de Brun et C. Chatelet bornèrent leurs recherches aux strates urgoniennes qu'ils définissent comme les « couches récifales du Barrémien supérieur » (de Brun *et al.*, 1916, p. 5) de la combe des Espeiras (commune des Plans) et de la carrière des Angostrines (alors nommée « Angustines »). Leurs observations les amenèrent à rejeter l'idée d'un Urgonien bédoulien dans cette région.

En 2006, B. Olivier et M.H. Chaupitre rendaient un rapport sur l'Urgonien de la région du Dôme de Lussan. Ils attribuèrent à la série urgonienne de cette région un âge barrémien supérieur et Bédoulien inférieur.

En 2007, la société TOTAL mis en place une équipe de trois personnes afin de mener une étude pluridisciplinaire sur l'Urgonien du Gard.

Une sédimentologue étudia l'organisation séquentielle de la série urgonienne à travers l'étude de nombreuses coupes et des « cuttings » de nombreux puits. La plupart de ces coupes et puits ont d'ailleurs été repris dans cette étude. Additionnée aux observations de terrain, celle des microfaciès et de la microfaune en lames minces a permis à D. Duchamp de proposer un découpage séquentiel de chaque coupe et puits étudiés. Les corrélations ainsi engendrées ont montré des variations d'épaisseurs et d'environnements de dépôt de la série urgonienne non négligeables (cf. Figure 2-7, p. 66).

En parallèle, une étude hydraulique et hydrogéologique du secteur fut menée. Afin de comprendre le comportement de l'eau dans un tel réservoir, des traçages ont été réalisés, des sources suivies et le niveau piézométrique relevé à différentes périodes dans de nombreux puits. A l'issue de cette étude, des unités hydrogéologiques ont pu être définies et des cartes piézométriques dessinées. Deux anomalies hydrogéologiques ont ainsi été mises en évidence. Un drain, au sud du secteur, longeant globalement la rivière « Gardon », et une barrière, au nord, près de

la rivière « Cèze » (cf. Figure 2-8, p. 67).

L'étude des fractures, failles, plis, et autres objets structuraux permet de reconstituer l'histoire tectonique de la région depuis le Barrémien jusqu'à nos jours (cf. Figure 2-9, p. 68). La réalisation de ce calendrier tectonique rend possible la mise en évidence des structures d'orientation N 110°

L'ensemble de ces données (sédimentologiques, hydrogéologiques et structurales) ont ensuite été intégrées dans un géomodeleur (gOcad) afin de réaliser un modèle de l'Urgonien du Gard. Plusieurs modèles d'évolution de la plateforme urgonienne gardoise furent proposés. C'est finalement un modèle en trois blocs basculés séparés par deux failles d'orientation N 110° positionnées au niveau des anomalies hydrogéologiques qui présente le plus de cohérence avec les données intégrées. Les séries les plus réduites et donc les environnements de dépôts sont les plus internes se trouvent alors en tête de blocs, contrairement aux séries plus épaisses présentant des faciès plus ouverts qui sont situées en pied de blocs (cf. Figure 2-10, p. 69).

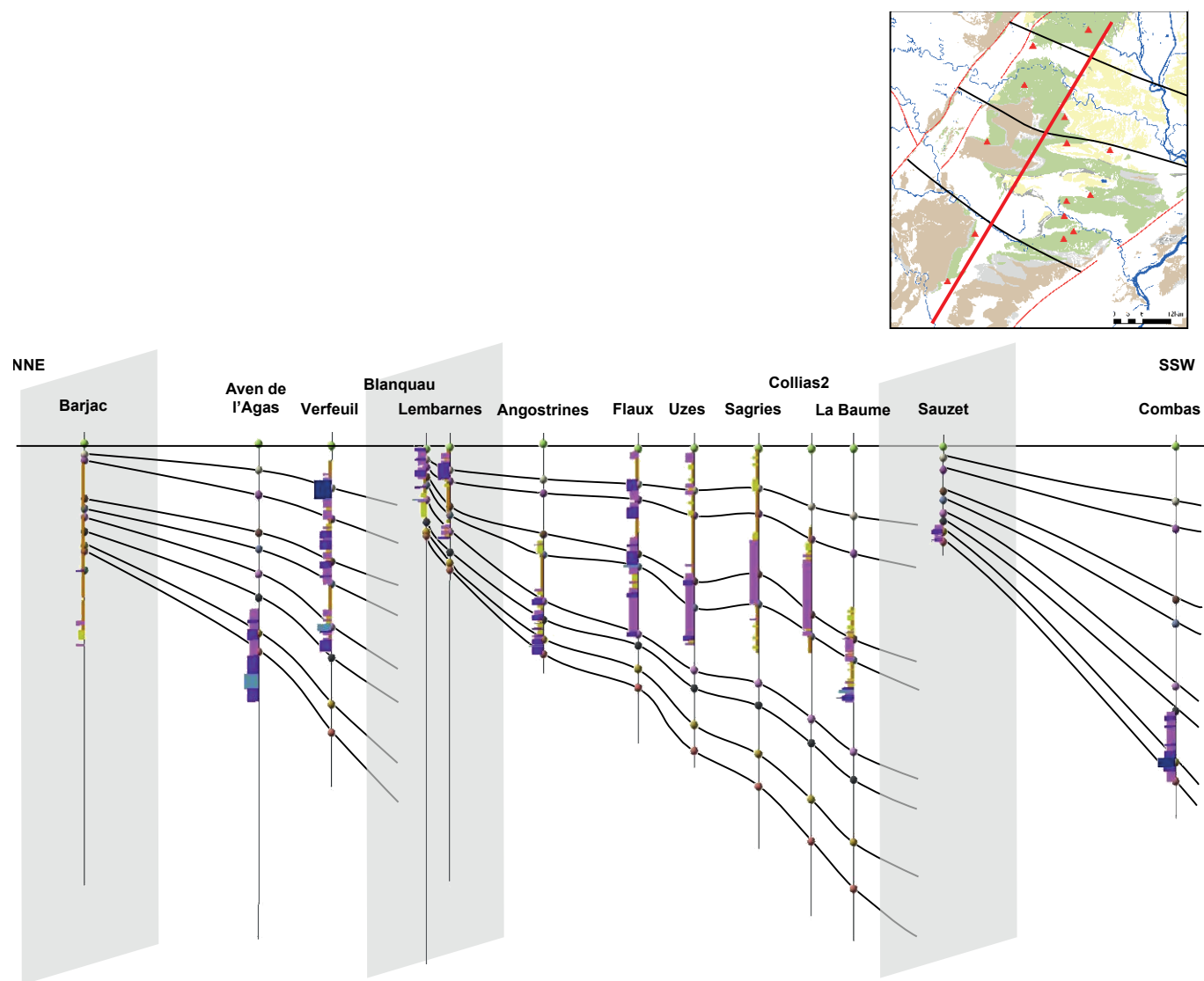


Figure 2-7 : Corrélation de coupes et puits du Gard, le long d'un transect nord-nord-est - sud-sud-ouest (trait rouge sur la carte). Les traits gris (sur la carte) et les rectangles gris représentent les failles délimitant les blocs basculés.

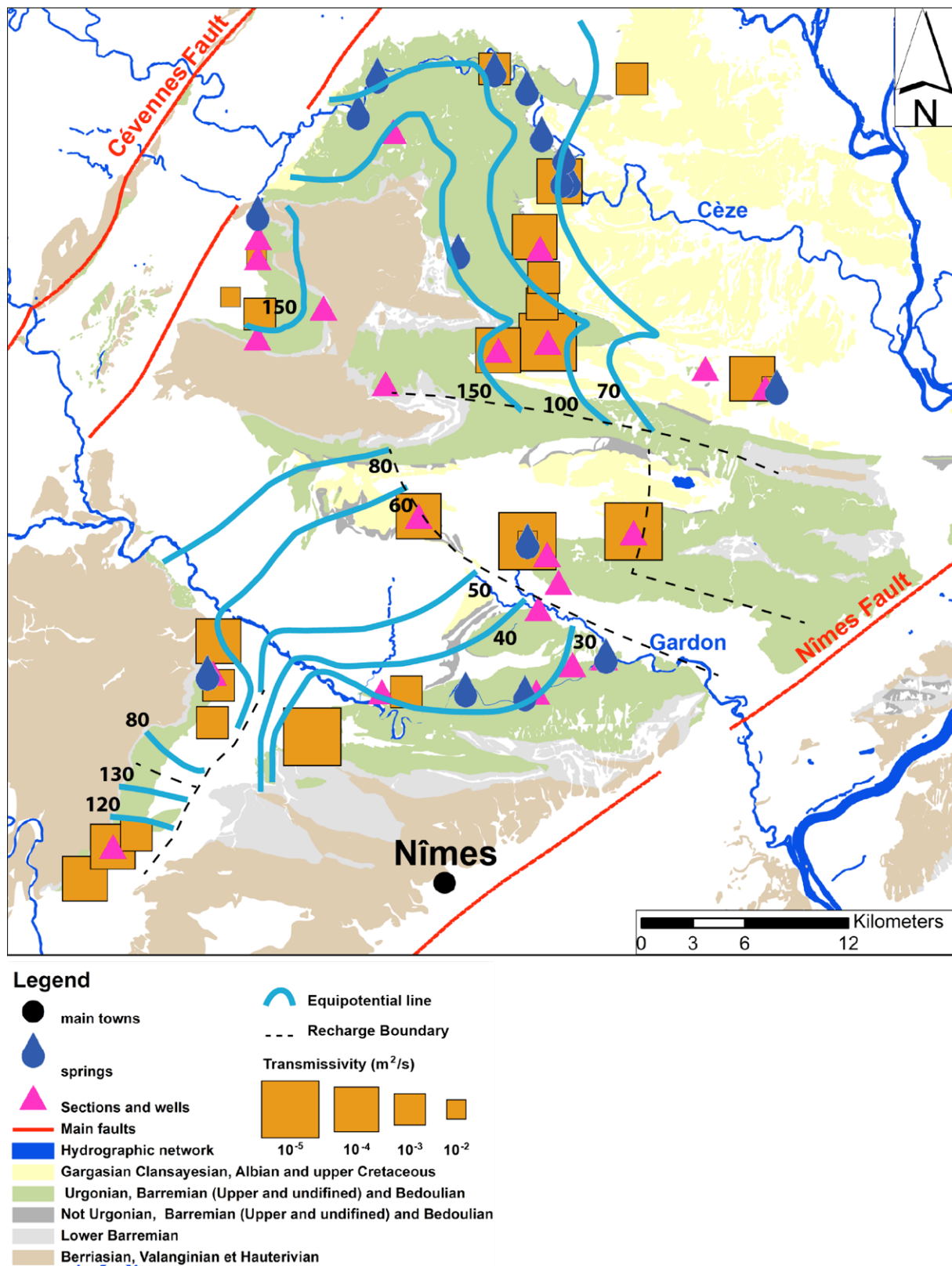


Figure 2-8 : Carte représentant la localisation des points de données et leurs interprétations hydrogéologiques dans le secteur du Gard (modifié depuis Descamps, 2009).

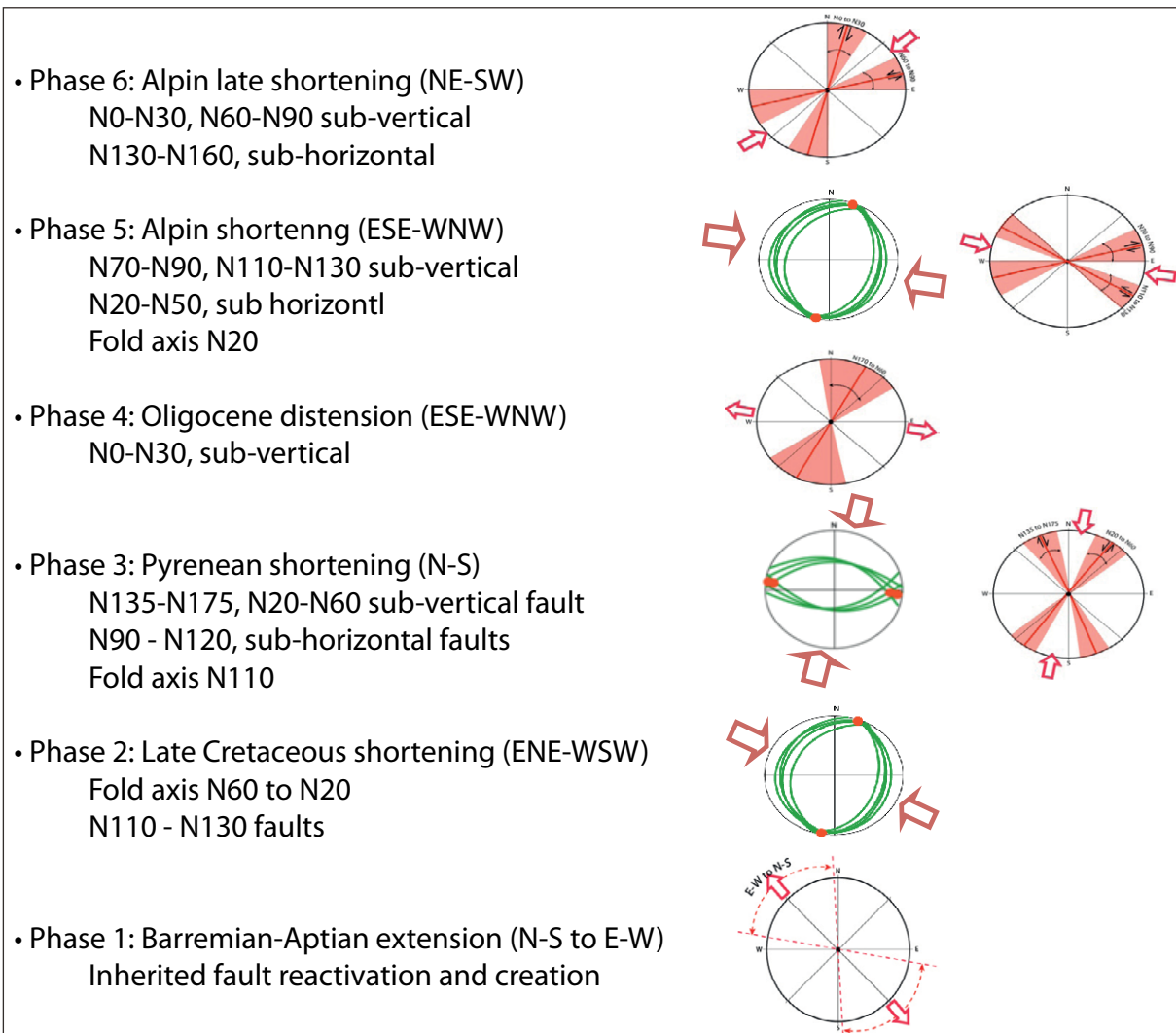


Figure 2-9 : Calendrier tectonique du secteur du Gard (modifié depuis Descamps, 2009)



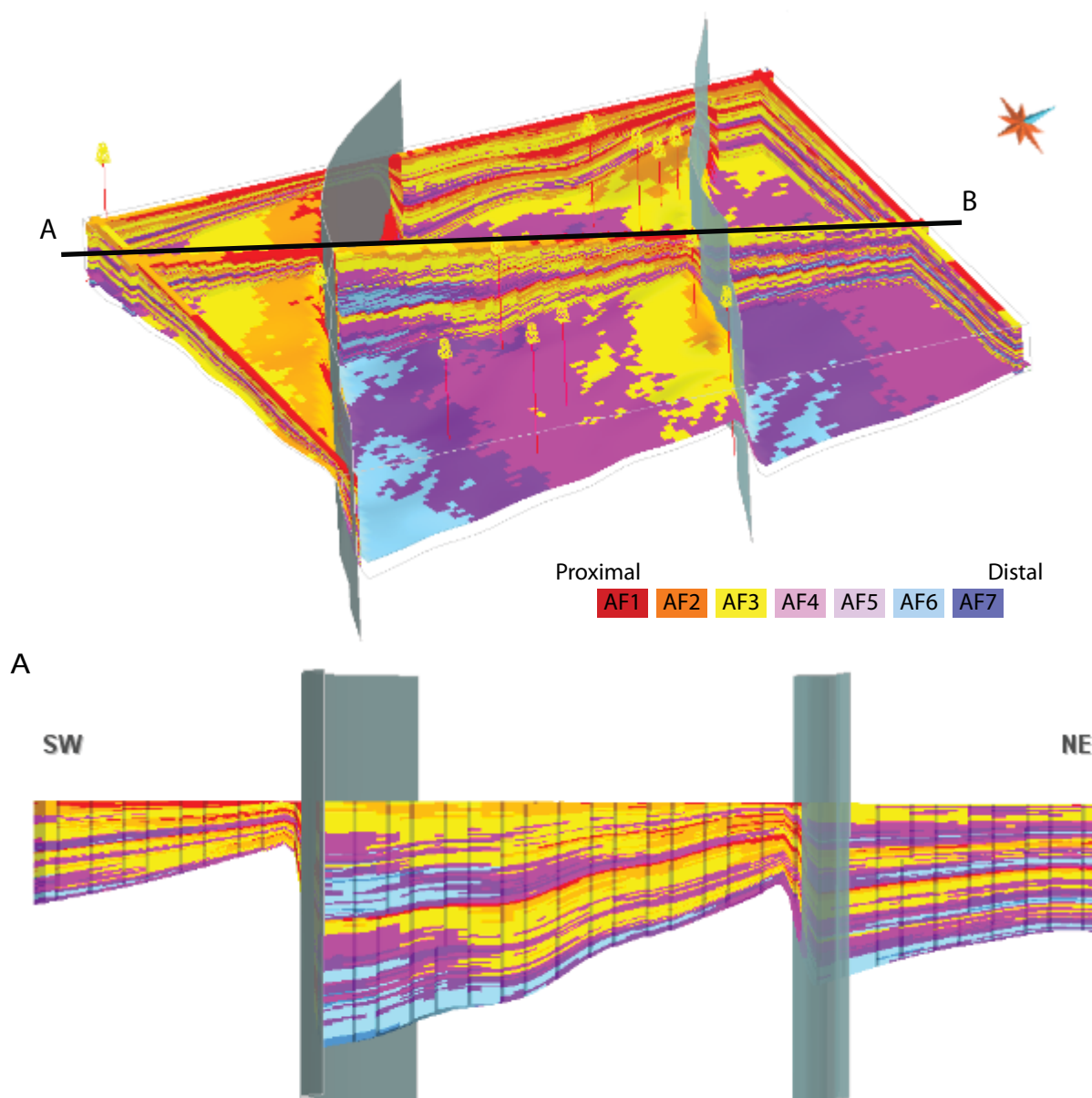


Figure 2-10 : Modèle structural en blocs basculés renseigné en environnement de dépôt du secteur du Gard (cf. carte de la Figure 2-7, p. 66) (Descamps *et al.*, 2009)





# Chapitre 3 :

## Les nouveaux outils et éléments de corrélation

### Résumé :

Ce chapitre, rédigé sous forme d'article, présente les différents outils développés dans cette étude afin de déterminer le découpage stratigraphique de la série urgonienne du Sud-Est de la France.

Un modèle de microfaciès et une charte biostratigraphique y sont présentés, ainsi que les résultats des analyses géochimiques réalisées sur six coupes clés réparties sur les cinq secteurs du Sud-Est de la France.

La comparaison des signaux géochimiques ( $\delta^{13}\text{C}$  et concentrations en phosphore), ont permis de confirmer le découpage stratigraphique déterminé à partir des données biostratigraphiques et faciologiques et des observations de terrain. La mise en place de la plateforme urgonienne a été attribuée à la limite Barrémien inférieur - Barrémien supérieur sur l'ensemble du secteur d'étude, excepté en Provence où les premiers faciès à rudistes sont attribués à l'Hauterivien.

Les très faibles concentrations en phosphore mesurées sur l'intégralité de la série urgonienne souligne le caractère oligotrophique de l'environnement dans lequel la plateforme urgonienne s'est développée.

New constraints on the age and evolution of the Urgonian Formation of southeastern France: sequence, micro-fauna assemblages, carbon-isotope stratigraphy and phosphorus contents

F. M. Bastide, K. B. Föllmi, T. Adate, A. Arnaud, J.E. Spangenberg, A. Godet, H. Arnaud, G. Massonnat

## ABSTRACT

In southeastern France, Urgonian successions of late Early Cretaceous age outcrop in five main regions around the Vocontian basin - the Vercors, Ardèche, the Gard, Vaucluse and Provence areas. Each sector has been studied independently by many authors since the middle of the nineteenth century. In spite of the important contributions furnished by these studies, uncertainties remain with regards to the stratigraphic subdivision of and the age attributed to the Urgonian Formation and an overarching study for the entire region is lacking. For this study, 52 sections and wells from all five regions were sampled and analyzed for their facies and microfacies, and bio- and sequence stratigraphy. A sequence stratigraphy model is proposed based on field observations, a dedicated microfacies model and the age indications obtained by benthic foraminiferal biostratigraphy. In addition, six key sections (Gorges du Nan, Gorges de l'Ardèche, Pont de Laval, Angostrines, Fontaine and Candelle) were selected for carbon-isotope and phosphorus analyses. The results of these analyses are used both for the reconstruction of changes in trophic levels and carbon burial, as well as for correlation purposes between the five main sectors.

In the Provence area, the detailed chemostratigraphic framework associated with the microfauna biostratigraphy suggests an onset of Urgonian deposition during the Hauterivian period, a possible hiatus covering the early Barremian, and a late Barremian age for the remainder of the Urgonien of this region. In the sectors directly bordering the Vocontian basin, the correlation of the geochemical curves and the biostratigraphy proves that the Urgonian Formation developed during the late Barremian and the beginning of the early Aptian. The upper Barremian sediments are divided into three third-order sequences (Ba3, Ba4, and Ba5) and the lower Aptian succession comprises one third-order sequence (A1).

The short-term trends in the  $\delta^{13}\text{C}$  records of the six analyzed sections are used for correlation and confirm the age attributions proposed here. The long-term trends correlate rather

well with the (hemi-)pelagic records, with the exception of the latest Barremian. Phosphorus contents tend to decrease during the shallower facies in sequences Ba4 and Ba5. The low phosphorus values (10 - 60 ppm on average) in these latter sequences confirm the oligotrophic character of the Urgonian depositional environment.

The results presented in this study furnish a robust and reliable architecture to correlate the Urgonian successions in entire southeastern France, and a solid base for an appropriate conception of the development of this formation at a regional scale.

Keywords: Urgonian, Geochemistry, Biostratigraphy, Facies model, Vocontian basin, Early Cretaceous, Carbonate platform, Southeastern France

# 1 INTRODUCTION

The principal facies type of the Urgonian series corresponds to a carbonate platform setting, which is characterized by the presence of numerous rudists. *Sensu largo*, it also comprises closely-related platform facies types including hermatype corals and stromatoporoids, and bioclastic and oolitic sediments. During the Early Cretaceous epoch, periods of generally warm climate conditions and elevated sea level covering larger continental regions were favorable to the development of carbonate platforms (Skelton et al., 2003). Such a period occurred during the Barremian and earliest Aptian, during which Urgonian-type carbonate platforms expanded in tropical and subtropical regions (Ager, 1981). The Urgonian deposits are important not only for our general understanding of climate and environmental conditions during the late Early Cretaceous, but also for industrial purposes, because they may host important oil fields, such as in the Middle East (Borgomano et al., 2002 ; Al Ghamdi et al., 2010 ; Amthor et al., 2010).

In southeastern France, Urgonian sediments occur in different regions surrounding the former Vocontian Basin (Fig. 1), where they were extensively studied by many authors since the middle of the nineteenth century (e.g., d'Orbigny, 1847; Kilian, 1912; Goguel, 1932; Masse, 1976; Arnaud-Vanneau, 1980; Arnaud, 1981; Moss and Tucker, 1995). In spite of the wealth of data available, fundamental differences still consist in terms of the interpretation of the sequence stratigraphic evolution and the age attribution (e.g., Adatte et al., 2005; Godet et al., 2012 & 2010; Conrad et al., 2011; Clavel et al., 2013). Furthermore, a synthetic and overarching study covering all regions is still lacking. It is for these reasons that in this contribution, we propose a synthesis for the evolution of the Urgonian platform for all regions concerned in southeastern France. Our synthesis is based on the study and sampling of 52 sections and wells, spread over the five different regions in which the Urgonian series outcrop – Vercors, Ardèche, Gard, Vaucluse and Provence. The sections and wells were studied for their facies and microfacies distribution, and their biostratigraphy based on benthic foraminifera. Furthermore, six representative sections were selected (Gorges du Nan, Gorges de l'Ardèche, Pont de Laval, Angostrines, Fontaine and Candelle) for a high-resolution geochemical study with regards to their whole-rock  $\delta^{13}\text{C}$  and phosphorus records. The  $\delta^{13}\text{C}$  records were used for correlation purposes and the phosphorus records for the reconstruction of trophic levels and changes therein.

This contribution is a part of a Ph.D. thesis on the evolution of the Urgonian platform in southeastern France (Bastide, 2014).

## 2 GEOLOGICAL SETTING

The Urgonian sediments preserved today in southeastern France were once part of a large carbonate platform, which surrounded the epicontinental Vocontian basin to the north, west and south. The Vocontian basin was connected on its east side to the northern part of the Tethys Ocean (Figure 3-1, p. 75). The Urgonian platform was part of a larger platform, which extended for more than 2500 km along the northern Tethyan margin (e.g., Michalik, 1994; Föllmi and Gainon, 2008). Urgonian equivalents are also found on the southern margin of the Tethys Ocean, and, for instance, the occurrences in the Middle East are intensily studied for their reservoir properties (Borgomano et al., 2002 ; Al Ghamdi et al., 2010 ; Amthor et al., 2010).

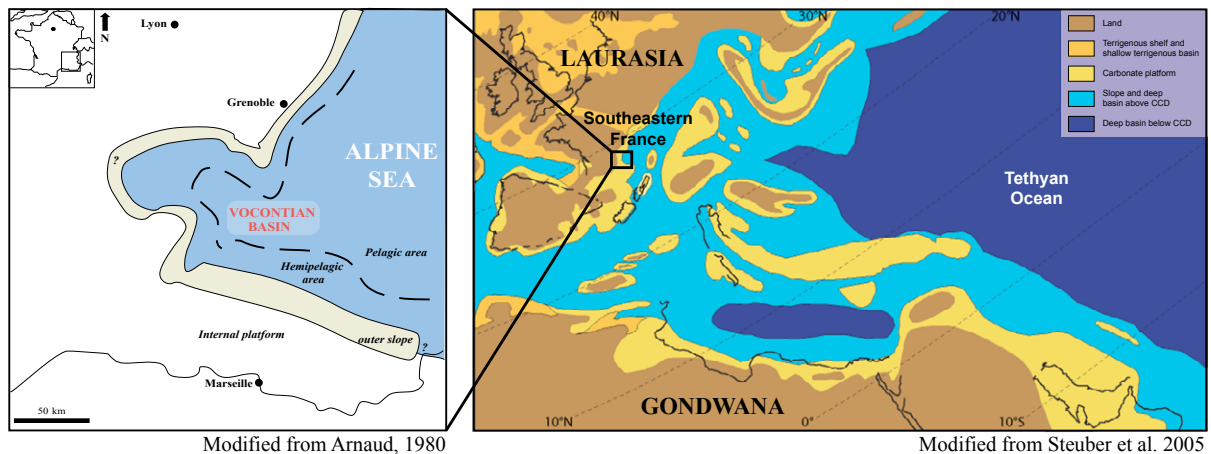


Figure 3-1 : Paleogeographical context of the Vocontian basin, late Barremian

Since the Early Cretaceous, southeastern France has been structurally deformed by tectonic episodes, which were mainly related to the Pyrenean and Alpine orogenies, and the deposition and distribution of the Urgonian sediments were profoundly influenced by these events. The geometry of the Urgonian Formation is directly related to the presence and activity of major faults, which crosscut the platform, and divided the platform in discrete sectors, which were subjected to differential subsidence and tilting. They are the Cevennes, Nîmes, Durance, Rencurel and Presles- Saillant-Condorcet Faults. In general, the paleogeography of the Urgonian platform, its syn- and postdepositional deformation, and the partial cover by younger sediments resulted in the geographic repartition of the Urgonian sediments in southeastern France in five main sectors: Vercors, Ardèche, Gard, Vaucluse and Provence (Figure 3-2, p. 76).

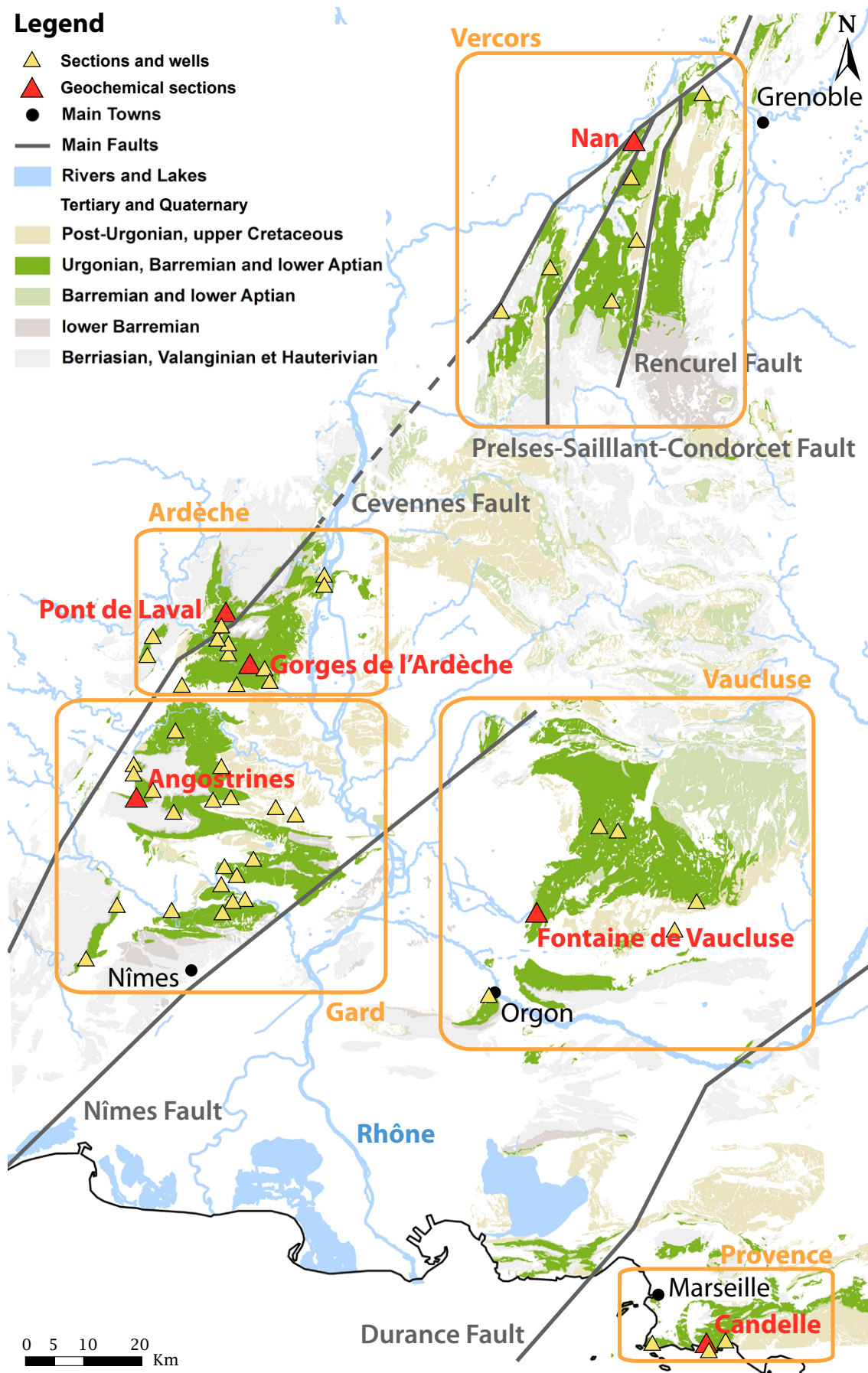


Figure 3-2 : Geological map of southeastern France, location of sectors and sections



## **3 METHODS AND TOOLS**

### **3.1 SAMPLING**

52 sections and wells (red and yellow triangles in Fig. 3-2) were studied and sampled for this contribution. Most sections, such as the Pont de Laval, Nan, Fontaine and the base of the Angostrines sections are located along a road or path. Those sections were sampled in a classical way with an average sampling rate of approximately 1 meter per sample, which was reduced to approximately 10 cm per sample in the case of facies changes or bed limits. Natural cliff sections such as the Gorges de l'Ardèche and Candelle sections, and artificial cliff sections, such as in the quarry of Angostrines, were sampled by abseiling with the same sampling rate as for the other sections. As an example, the Gorges de l'Ardèche section, which is composed of five consecutive and partly overlapping sections, was entirely sampled by abseiling along five cliffs cut and hollowed out by the Ardèche River.

The sections were examined with regards to their facies, paleontology and sedimentological structures, including bed limits and their lateral persistence, and the stratigraphic evolution of bed thicknesses.

In addition, cuttings from wells, which were drilled for groundwater or exclusively for this study, were collected every three meters during drilling.

From each sample and cutting, a thin section was produced.

### **3.2 SEQUENCE STRATIGRAPHY INTERPRETATION**

The sequence stratigraphic subdivisions proposed for the sections and wells studied and sampled for this project are based on (1) field observations such as the identification of flooding or emersive surfaces, and shallowing or deepening-upward trends, (2) on a dedicated microfacies model, which was used to infer paleoenvironmental and paleobathymetric trends, and (3) on the biostratigraphy of benthic foraminifera and especially Orbitolinids, which was used to date and correlate the distinguished sequences and systems tracts. This information was then used to identify sequence boundaries, transgressive surfaces and maximum-flooding surfaces, and as such to define the sequences in each section and well.



In order to test and confirm the correlations related to the sequence stratigraphic interpretations, an analysis of the whole-rock  $\delta^{13}\text{C}$  and phosphorus records was performed on six sections representative for each area (Gorges du Nan, Gorges de l'Ardèche, Pont de Laval, Angostrines, Fontaine and Candelle; red triangles in Figure 3-2, p. 76).

### 3.3 MICROFACIES MODEL : DEFINITION

16 microfacies types were determined on the basis of texture, fossil content, sediment constituents and cementation. In addition a seventeenth microfacies type was distinguished for reworked sediments. The microfacies types have been grouped into 6 microfacies associations labeled AF1 to AF6. Each microfacies association corresponds to a specific sedimentary (cf. Figure 3-3, p. 78) setting and therefore to a range of water depths. In this study, special attention was paid to changes in environmental conditions. Paleoenvironmental conditions interpreted to have been optimal for carbonate production are represented in the microfacies model by letters labeling the microfacies types in lower case. Conditions leading to reduced carbonate production, such as dysoxia or elevated input of nutrients and detrital material are labeled by letters in upper case.

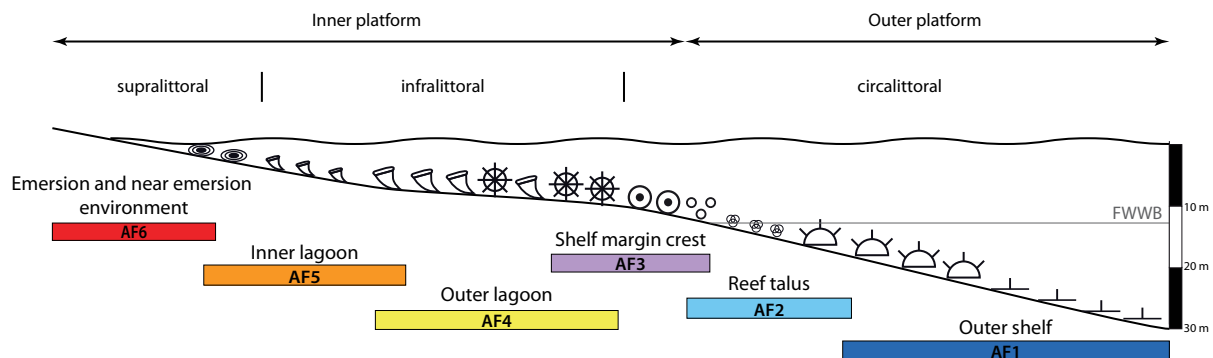


Figure 3-3 : Correspondence between facies types and environments on a carbonate platform (Legend in Annexe 1)

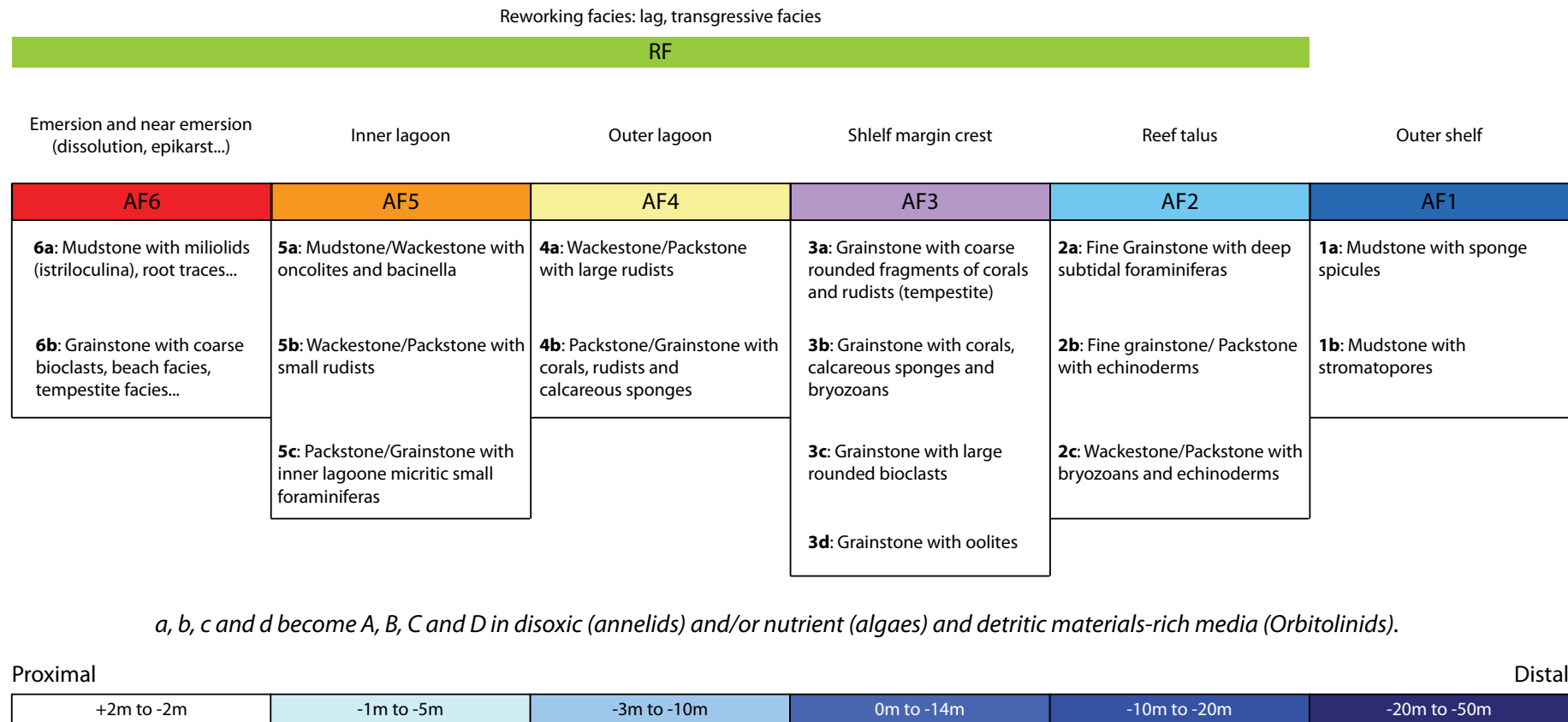
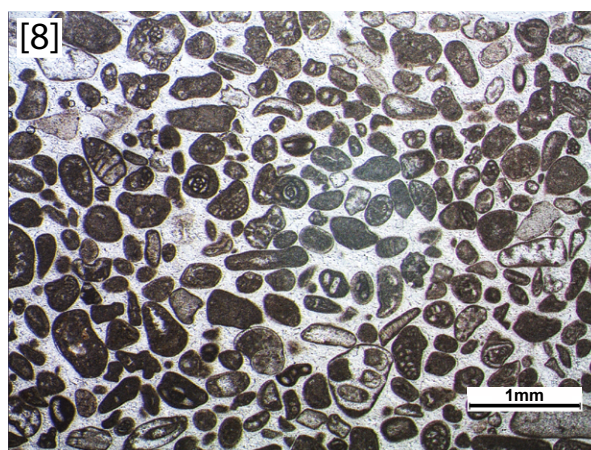
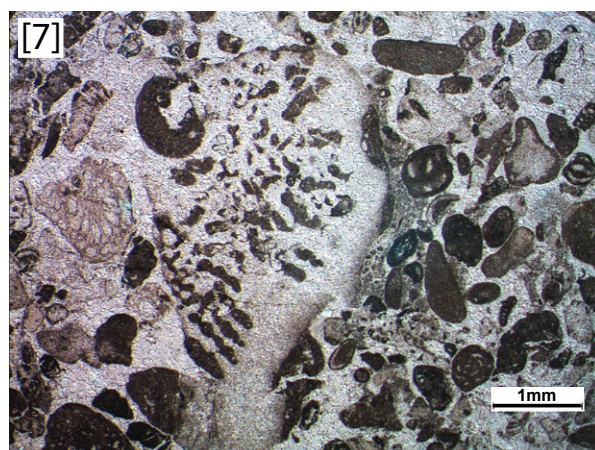
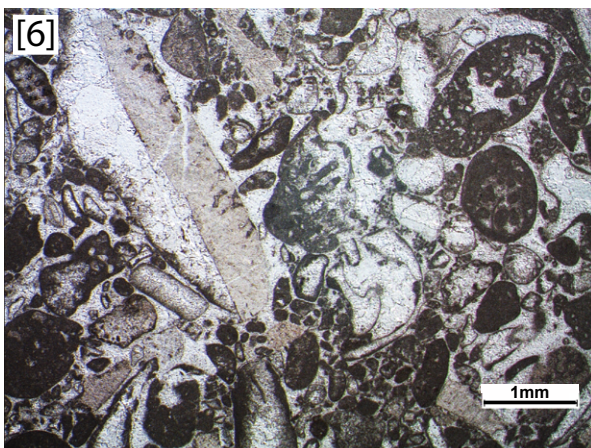
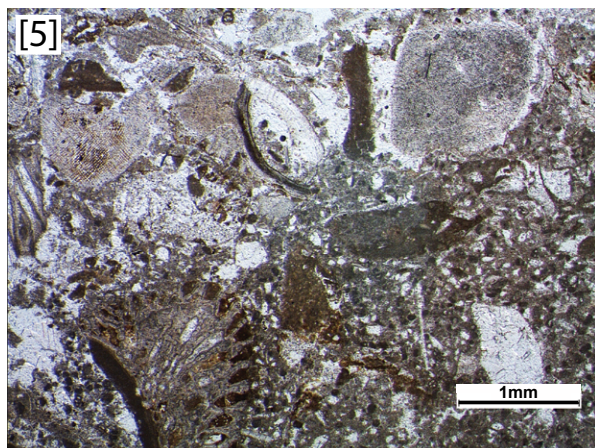
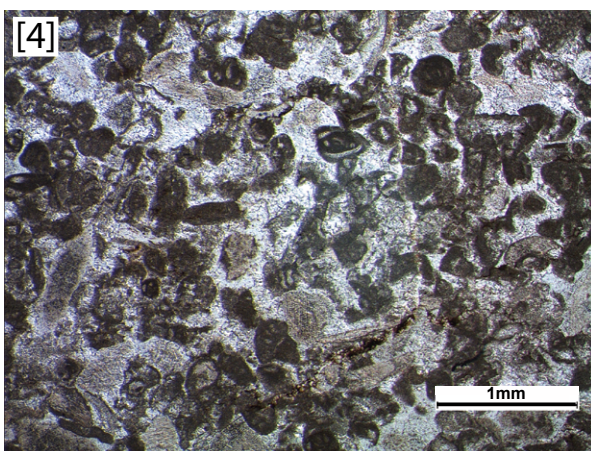
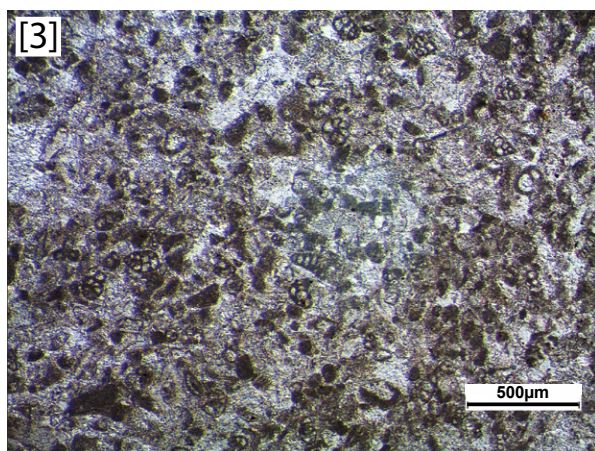
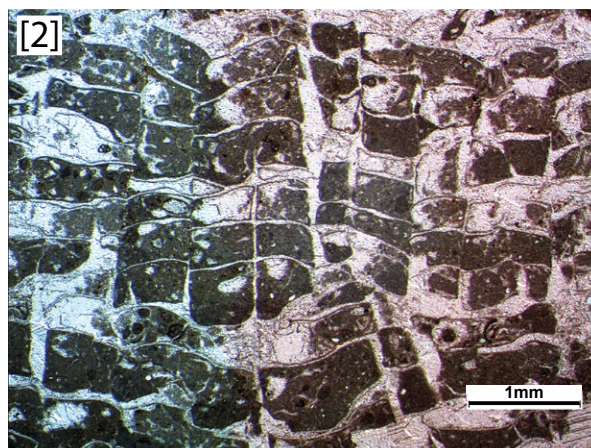
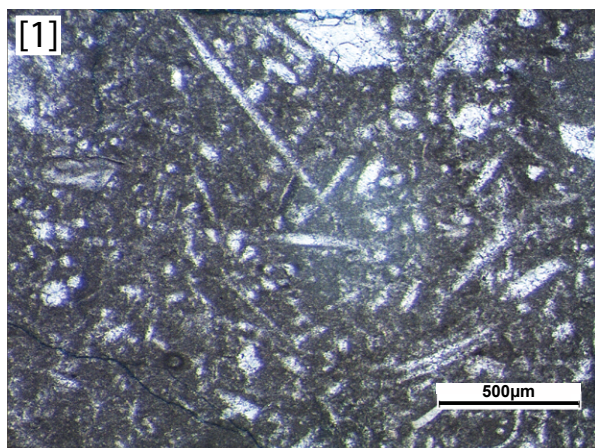
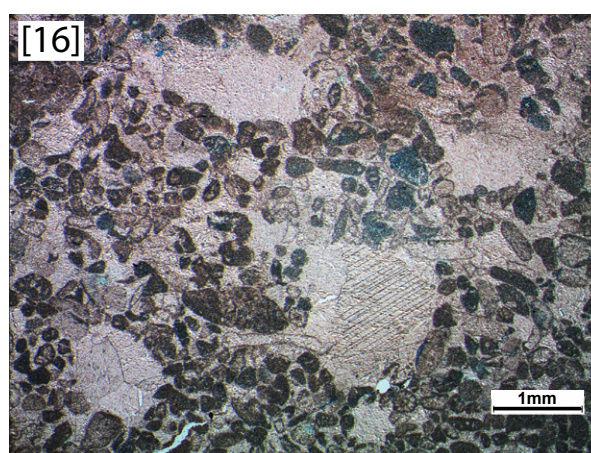
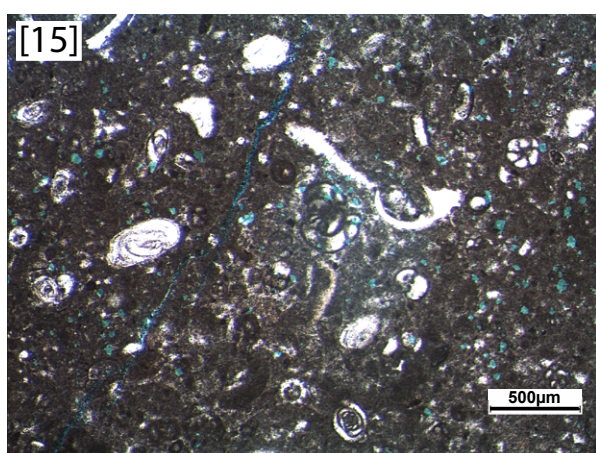
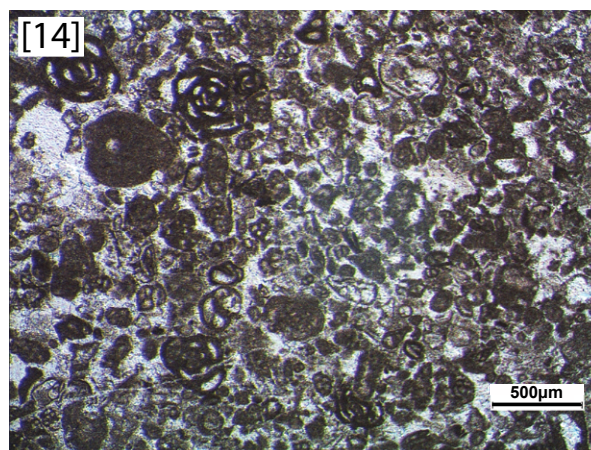
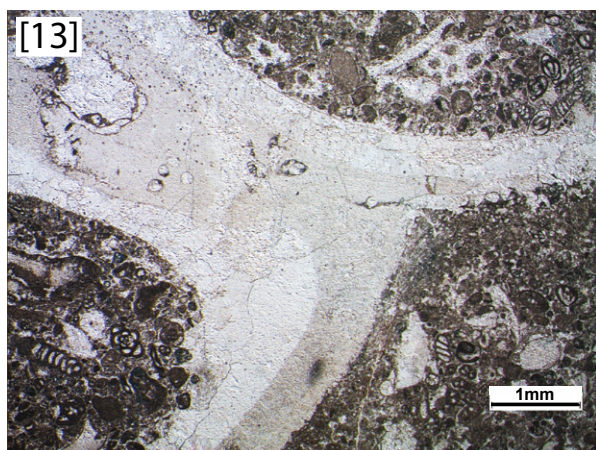
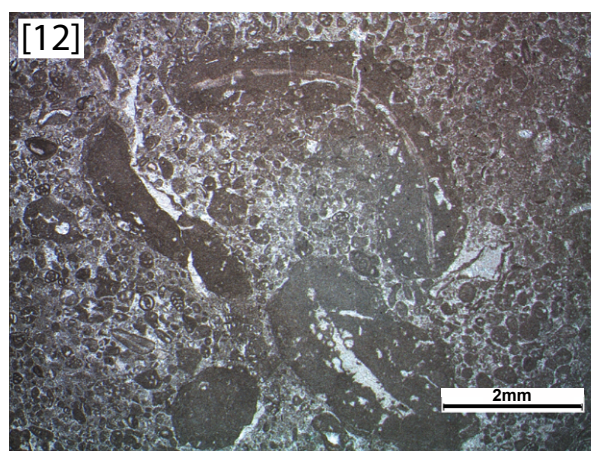
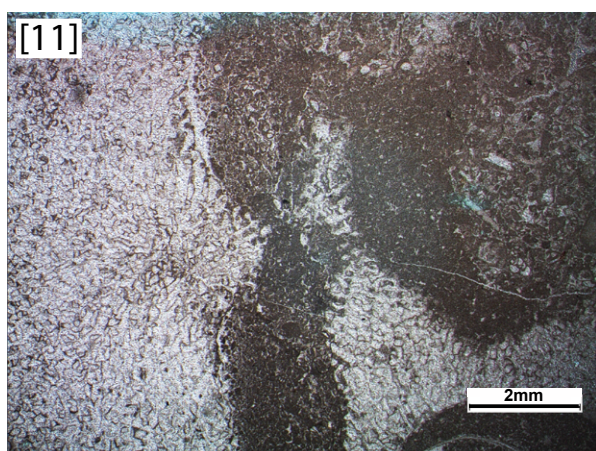
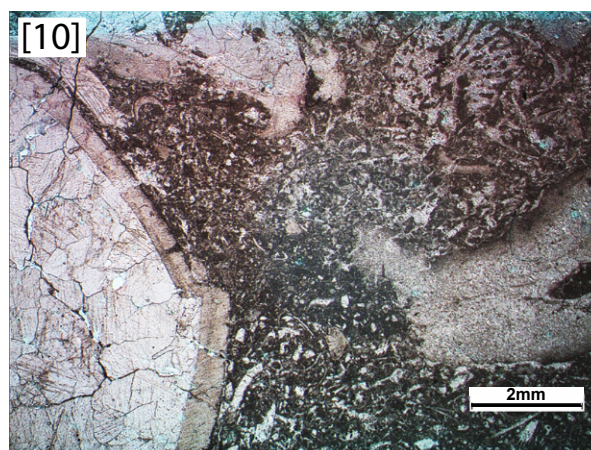
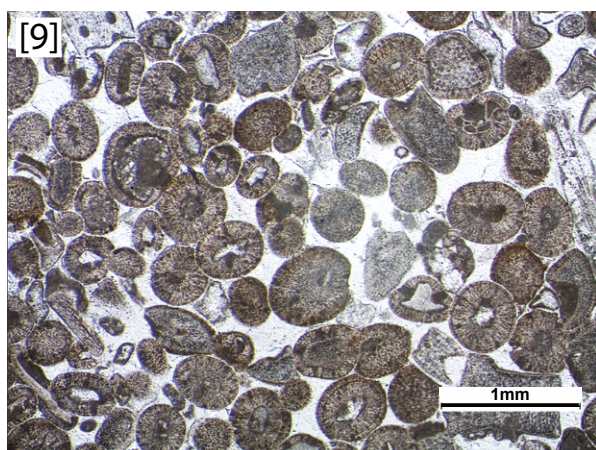


Figure 3-4 : Microfacies and microfacies association model











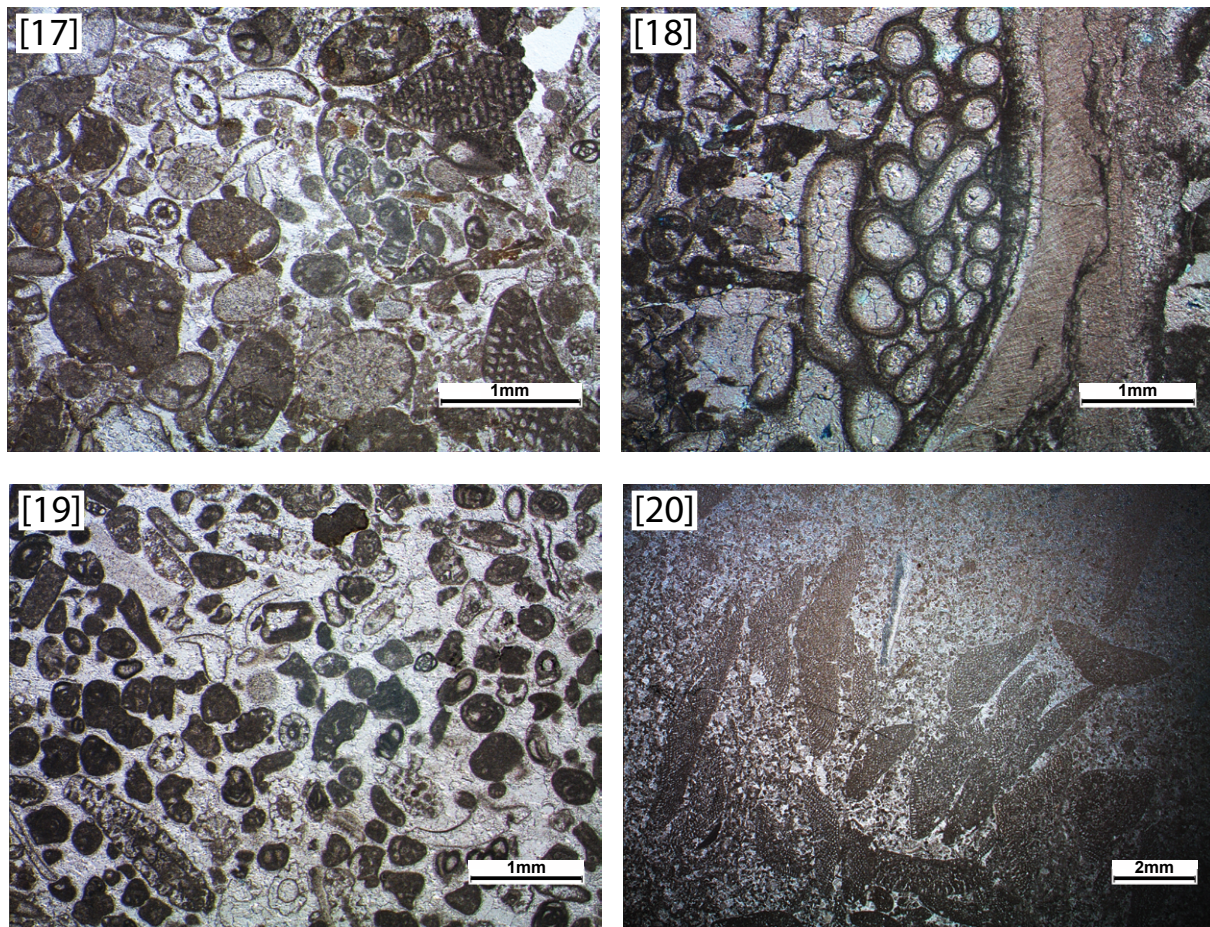


Figure 3-5 : Illustrations of the microfacies defined in the microfacies model created for this study.

- |   |  |
|---|--|
| [1] Microfacies 1a, LBFB 26, La Baume, Gard; HST BA4.           | [2] Microfacies 1b, LBS25, La Baume, Gard; TST Ba5.            |
| [3] Microfacies 2a Ang 117, Angostrines, Gard; TST Ba3.         | [4] Microfacies 2b Cha 18, Chames, Ardèche; LST Ba3.           |
| [5] Microfacies 2c MB 4, Mont Bouquet, Gard; TST Ba3.           | [6] Microfacies 3a PV 110, Pont de Laval, Ardèche; LST Ba3.    |
| [7] Microfacies 3b R 114, Rustrel, Vaucluse; HST A1.            | [8] Microfacies 3c Rev 89, Revaou, Ardèche; LST Ba3.           |
| [9] Microfacies 3d ST 16, Serre de Tourre, Ardèche; TST Ba3.    | [10] Microfacies 4a LBFB 23, La Baume, Gard; HST Ba4.          |
| [11] Microfacies 4b PV 128, Pont de Laval, Ardèche; LST Ba3.    | [12] Microfacies 5a ST 9, Serre de Tourre, Ardèche; LST Ba3.   |
| [13] Microfacies 5b R 153, Rustrel, Vaucluse; HST Ba5).         | [14] Microfacies 5c Rouv 101, Rouvière, Ardèche; TST A1.       |
| [15] Microfacies 6a Can 1_6, Candelle, Provence; HST Ba4).      | [16] Microfacies 6b Ang 2_27, Angostrines, Gard; HST Ba4.      |
| [17] Reworking microfacies LBS 42, La Baume, Gard; TST_Ba5.     | [18] Annelids microfacies LBS 18, La Baume, Gard; HST Ba5.     |
| [19] Algae microfacies PV 190, Pont de Laval, Ardèche; HST Ba3. | [20] Orbitolinids microfacies R 97, Rustrel, Vaucluse; TST A1. |

The microfacies types gathered in facies associations 1 and 2 both characterize circalittoral environments. Microfacies types 1a and 1b include fauna preferentially living below the fair weather wave base. They represent the most external facies observed in this study. The texture of the microfacies association 2 (AF2) is more granular. The associated microfauna lived typically below the fair weather wave base. The texture of the four microfacies types of microfacies association AF3 is grainstone, characteristic for high-energy environments. The depositional environment of microfacies type 3a is interpreted as a shallow circalittoral environment. The three

other microfacies types 3b, 3c and 3d characterize circalittoral to infralittoral environments.

The microfacies associations 4, 5 and 6 correspond to the carbonate platform environment. Depending on wind and current directions and intensities, the associated textures vary from mudstone to grainstone. Microfacies types 4a and 4b refer to infralittoral, open lagoonal environments where corals and rudists proliferate. Corals are absent in microfacies types 5a, 5b and 5c, and rudists are less well developed. Microfacies type 5a characterizes confined environments where bacterial activity is important. Microfacies association 6 corresponds to infralittoral to supralittoral environments. Microfacies type 6a includes *Istriloculina*, a good indicator of confined lagoonal environments. Microfacies type 6b corresponds to beach facies, and structures such as keystone vugs are common.

### **3.4 BIOSTRATIGRAPHY**

Numerous authors studied the macro- and microfauna of the Urgonian Formation in southeastern France (d'Orbigny, 1847 ; Leenhardt, 1883 ; Kilian, 1912 ; Gogel, 1932 ; Arnaud-Vanneau, 1980 ; Arnaud et al., 1998 ; Charollais et al., 1998 ; Masse, 1998; Clavel et al., 2009). These studies provided biostratigraphic age information based on different rudists, echinids, algae, and benthic foraminifera, especially orbitolinids. Orbitolinid biostratigraphy in Urgonian sediments is differently applied by different groups and the resulting age models are substantially different (e.g., Arnaud-Vanneau, 1980 ; Arnaud et al., 1998 ; Charollais et al., 1998; Clavel et al., 2013). For this project, we developed and used an updated version of the orbitolinid biostratigraphic chart established by Annie Arnaud-Vanneau for the Vercors and Chartreuse massifs (Arnaud-Vanneau, 1980; Arnaud et al., 1998, 2005).

### **3.5 STABLE-CARBON ISOTOPE AND PHOSPHORUS ANALYSES**

Six representative sections through the Urgonian series, located in the five different sectors, were chosen for an analysis of their stable carbon isotope and phosphorus records. The coordinates of the selected sections are referenced in Table 3-1. The purpose was to investigate stratigraphic changes in the  $\delta^{13}\text{C}$  and phosphorus records, their relationships with changes in the evolution of the Urgonian carbonate platform and with general changes in the  $\delta^{13}\text{C}$  and phosphorus records established in (hemi-)pelagic successions, and last but not least their potential to improve our correlation between the different sectors in southeastern France.

Sectors	Sections name	Lambert II extended coordinates	
		X	Y
Vercors	Nan	843214	2022898
Ardèche	Gorges de l'Ardèche	773819	1928259
	Pont de Laval	769876	1936027
Gard	Angostrines	752398	1904546
Vaucluse	Fontaine de Vaucluse	825154	1883528
Provence	Candelle	854673	1806081

Table 3-1 : Sections coordinates

Both stable isotope and phosphorus analyses were performed at the Institute of Earth Sciences of the University of Lausanne. Bulk-rock samples from the six sections were first sawed in order to eliminate the altered parts and calcite veins. Then, powders were obtained using an agate crusher. A Thermo Fisher carbonate-preparation device and Gas Bench II connected to a Thermo Fisher Delta Plus XL isotope ratio mass spectrometer (IRMS), which was operated in the continuous He flow mode were used. The stable carbon-isotope ratios are reported in the delta ( $\delta$ ) notation as the per mil (‰) deviation relative to the Vienna Pee Dee belemnite standard (VPDB). The analytical reproducibility estimated from replicate analyses of the laboratory standard Carrare marble was better than  $\pm 0.05\text{‰}$  for  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\pm 0.1\text{‰}$  for  $\delta^{18}\text{O}$ .

With regards to the phosphorus analyses, around 100 mg of powder were mixed with 1 ml of  $\text{MgNO}_3$  and left to dry in an oven at  $45^\circ\text{C}$  for 2 hours. The samples were then ashed in a furnace at  $550^\circ\text{C}$  during two hours. After cooling, 10 ml of 1N HCl were added and placed under constant shaking for 14 hours. The solutions were filtrated with a  $63\text{ }\mu\text{m}$  filter, diluted ten times, and analyzed using the ascorbic acid method of Eaton et al. (1995). For this process, the solution was mixed with ammonium molybdate and potassium antimonyl tartrate, which in an acid medium react with orthophosphate to form phosphomolybdic acid. This acid is reduced with ascorbic acid to form an intense blue color. The intensity of the blue color is determined with a photospectrometer (Perkin Elmer UV/Vis Photospectrometer Lambda 10). The concentration of  $\text{PO}_4$  in mg/L is obtained by calibration with known standard solutions. Replicate analyses of samples have a precision better than 10% in the case of low P concentrations (such as is the case with the Urganian samples).



## 4 RESULTS

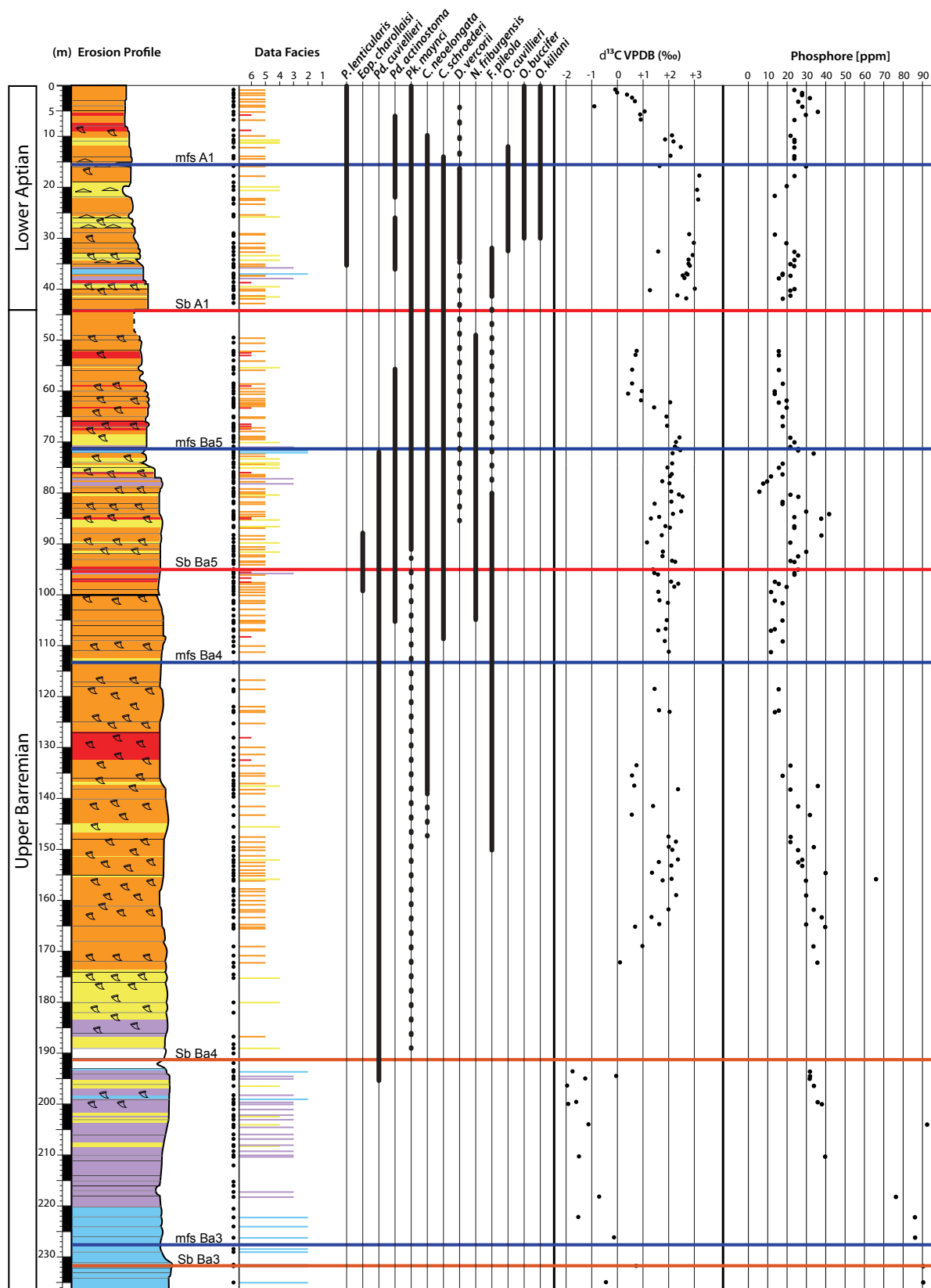


Figure 3-6 : Facies, sequence-stratigraphic subdivision,  $\delta^{13}\text{C}$  values and phosphorus concentration in the Nan section (Legend in Annex 1). For the colours facies legend, refer to the Figure 3-4, p. 79.



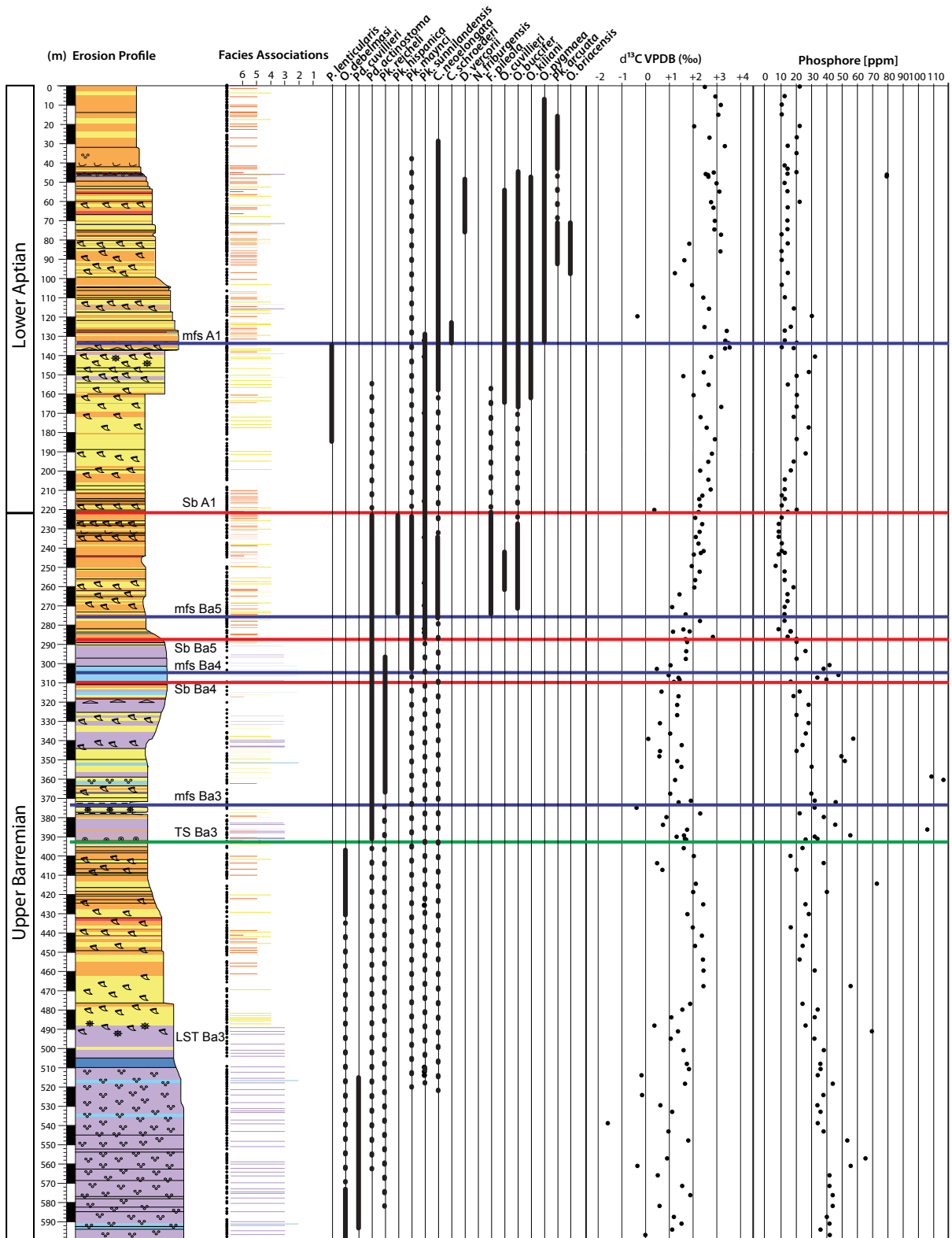


Figure 3-7 : Facies, sequence-stratigraphic subdivision,  $\delta^{13}\text{C}$  values and phosphorus concentration in the Gorges de l'Ardèche section (Legend in Annex 1). For the colours facies legend, refer to the Figure 3-4, p.

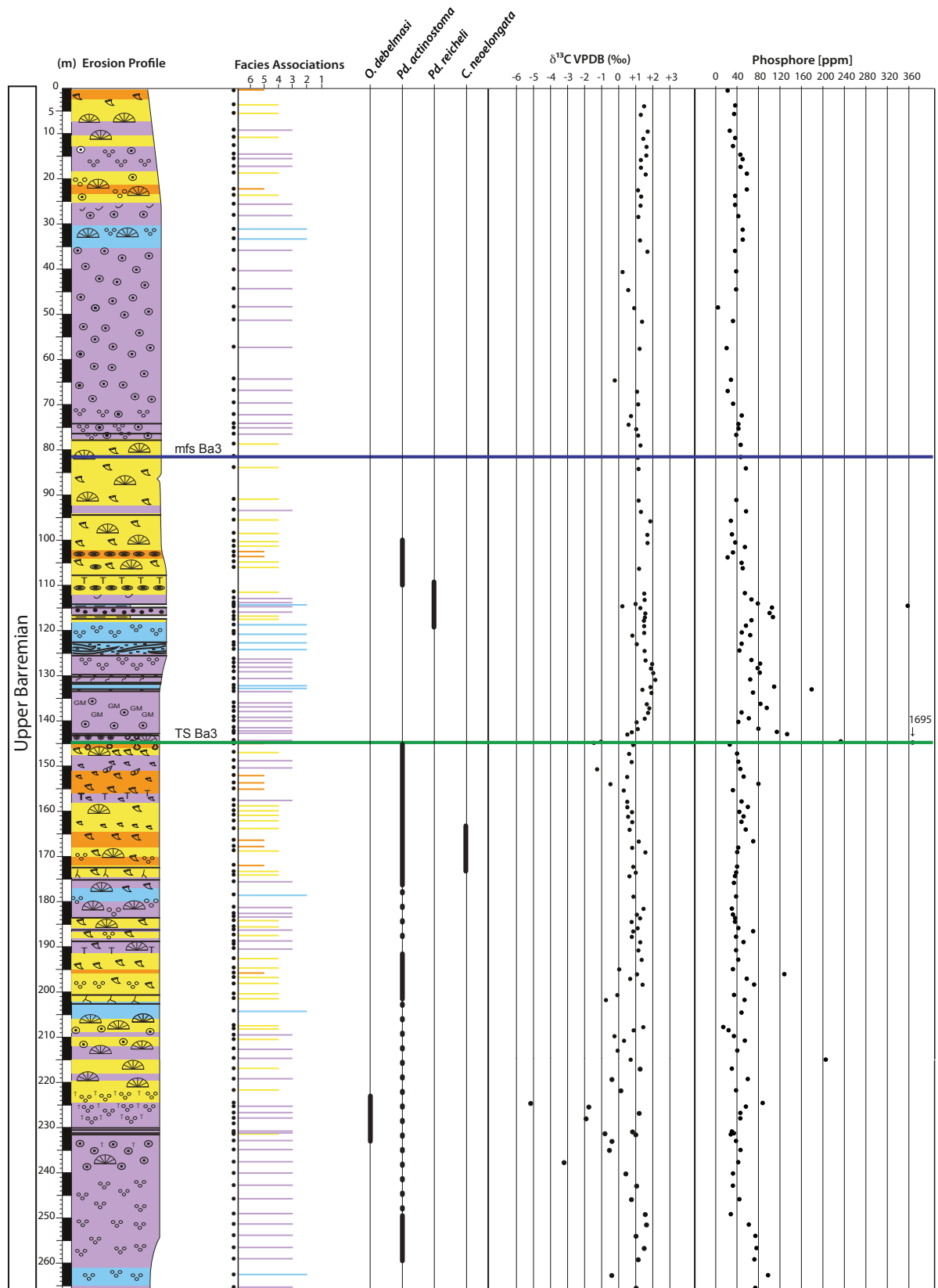


Figure 3-8 : Facies, sequence-stratigraphic subdivision,  $\delta^{13}\text{C}$  values and phosphorus concentration in the Pont de Laval section (Legend in Annex 1). For the colours facies legend, refer to the Figure 3-4, p. 79

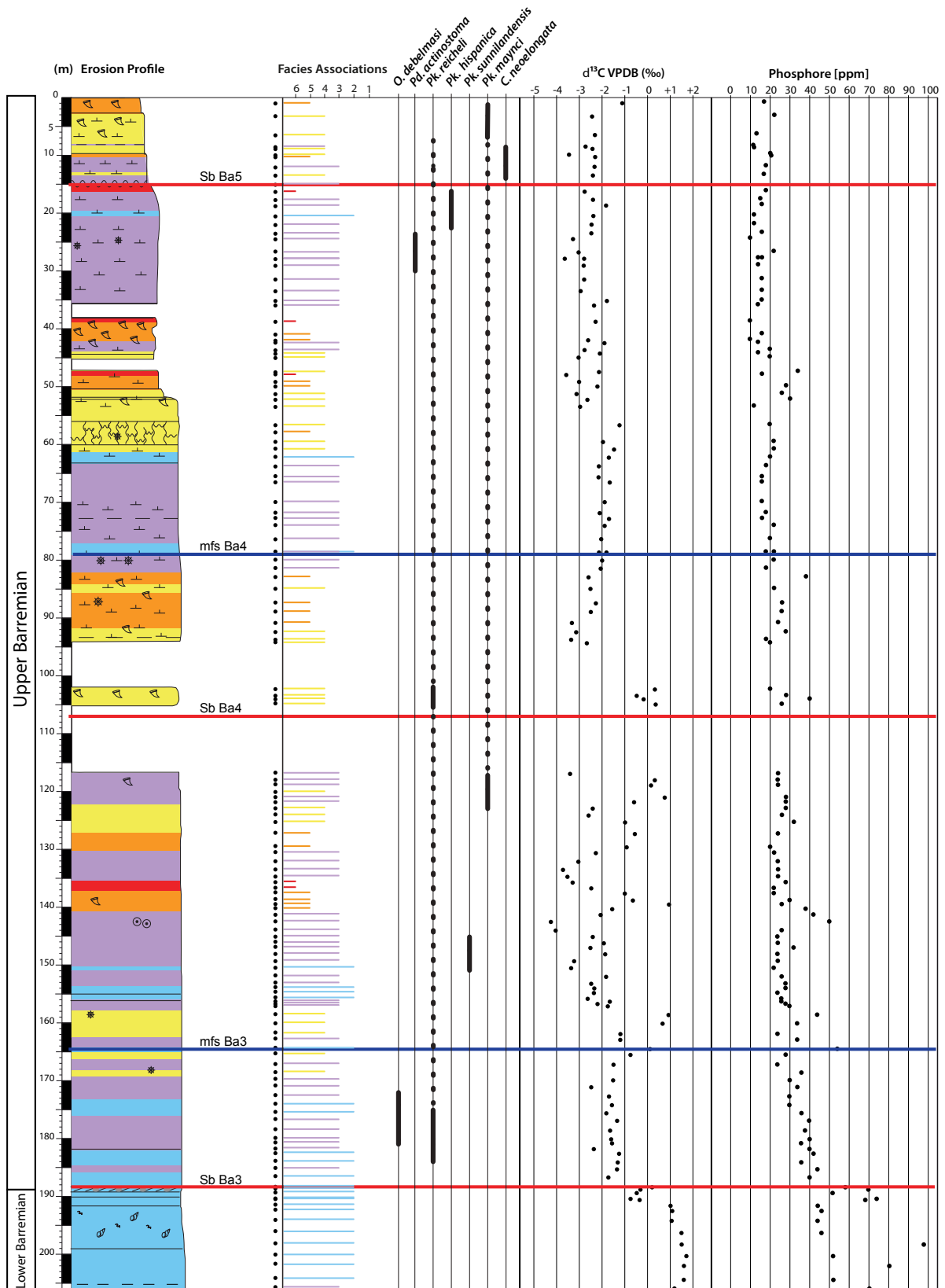


Figure 3-9 : Facies, sequence-stratigraphic subdivision,  $\delta^{13}\text{C}$  values and phosphorus concentration in the Angostrines section (Legend in Annex 1). For the colours facies legend, refer to the Figure 3-4, p. 79

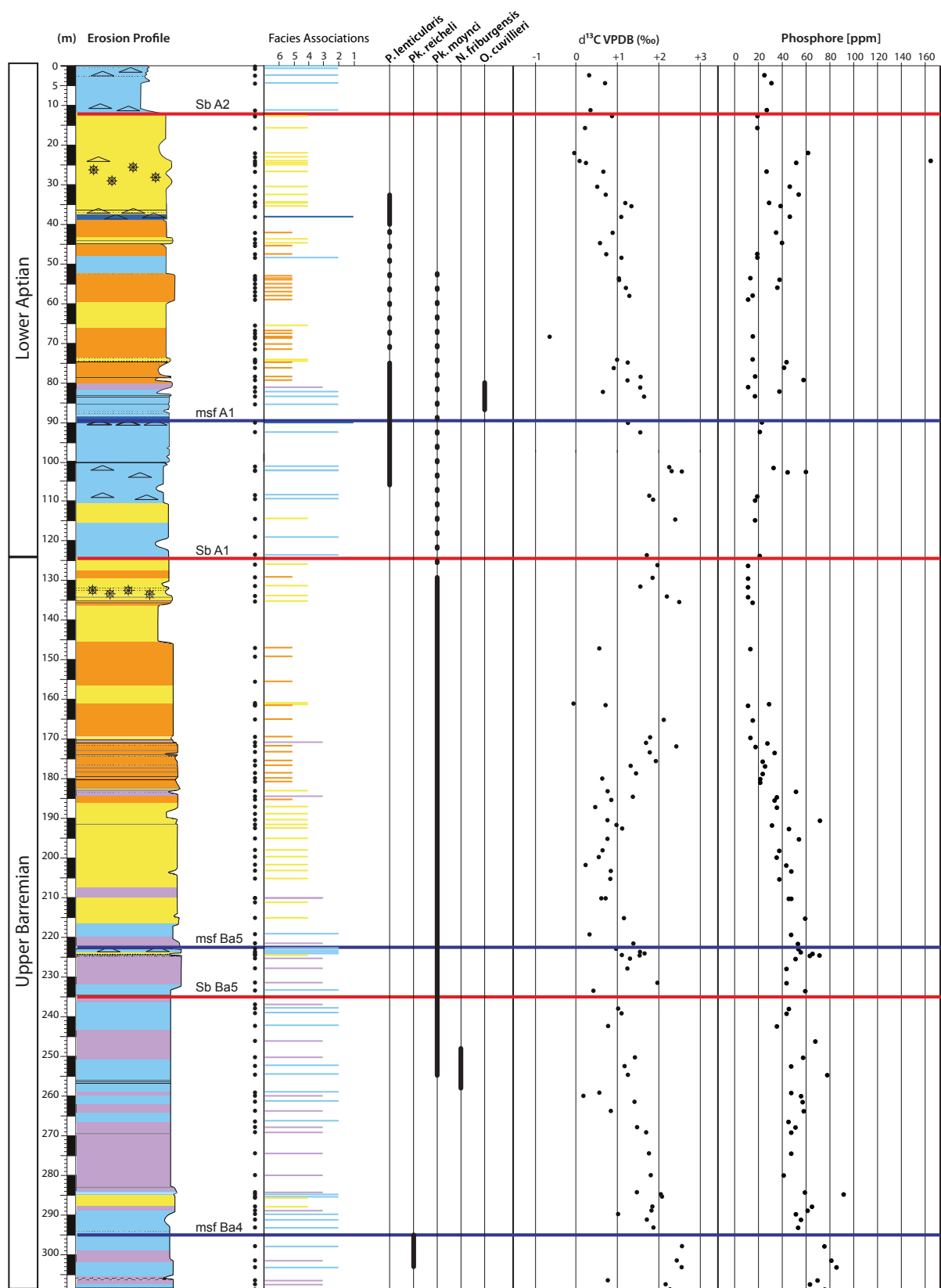


Figure 3-10 : Facies, sequence-stratigraphic subdivision,  $\delta^{13}\text{C}$  values and phosphorus concentration in the Fontaine section (Legend in Annex 1). For the colours facies legend, refer to the Figure 3-4, p. 79

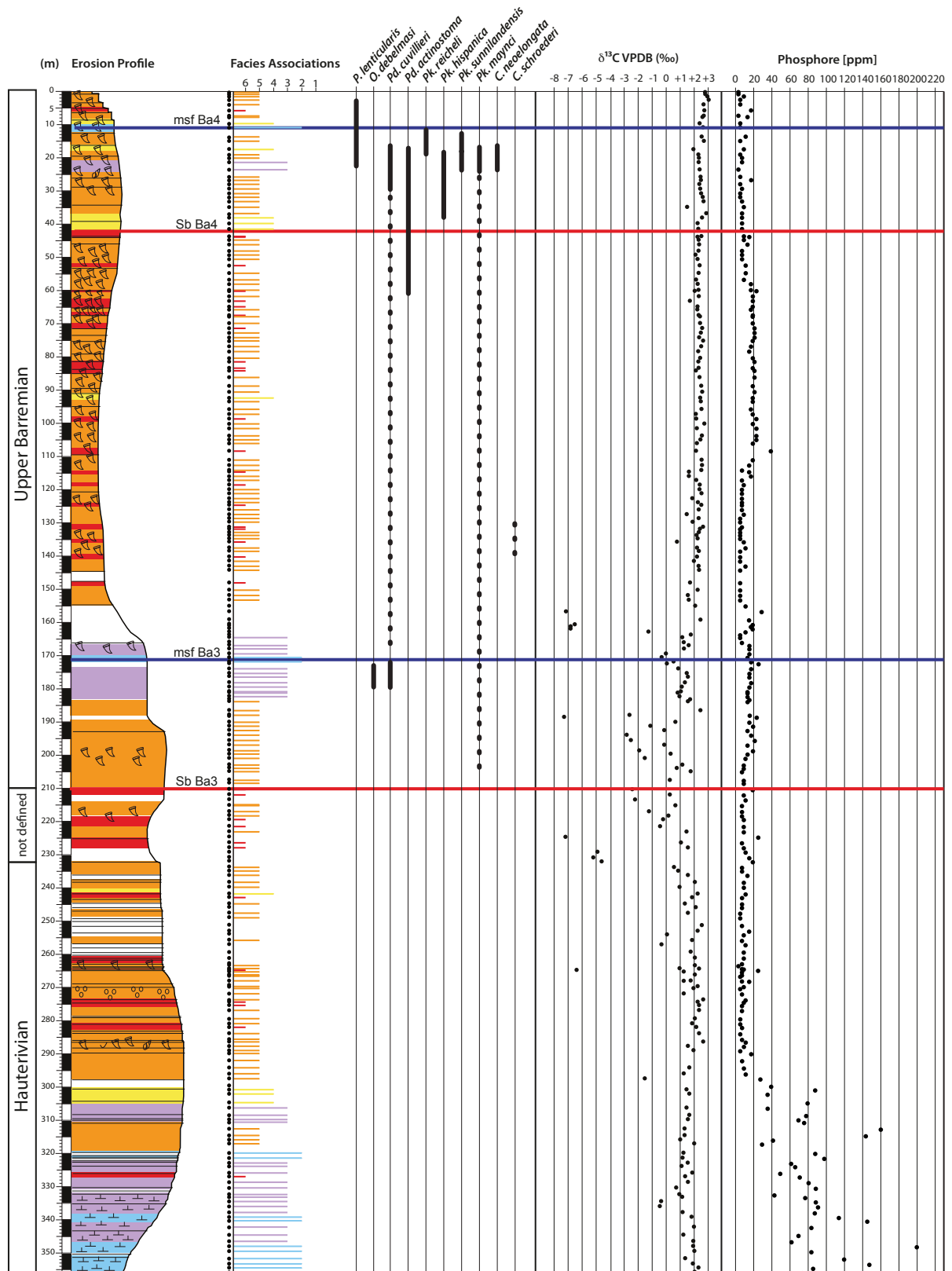


Figure 3-11 : Facies, sequence-stratigraphic subdivision,  $\delta^{13}\text{C}$  values and phosphorus concentration in the Candelle section (Legend in Annex 1). For the colours facies legend, refer to the Figure 3-4, p. 79.

## 5 INTERPRETATIONS

### 5.1 SEQUENCE STRATIGRAPHIC INTERPRETATION: THE EVOLUTION OF STRATIGRAPHIC SEQUENCES IN SPACE AND TIME.

Each facies association used here corresponds to a specific sedimentary setting ranging from the inner platform to the outer shelf, and the study of stratigraphic changes in facies associations provides information on the bathymetric evolution. Translation of certain platform sectors by subsequent tectonic deformation is minimal and the location of the sections and wells corresponds rather well to their original position on the Urgonian platform. For geometrical reasons, only transgressive and regressive systems tracts are present. The lowstand systems tract of the first sequence studied (LST Ba3) was sampled in sections located on the platform border. The progradational evolution of the Urgonian platform induced the progressive shift in younger LSTs toward the Vocontian basin.

The lowstand systems tracts (LSTs) are characterized by important accumulations of bioclastic grainstone, which include slumps and were mainly derived by gravity-flow deposition. In the following, during the minimum in relative sea level and following sea-level rise ??, prograding parasequences composed of more and more internal facies were deposited. Finally, aggrading sequences, constituted by similar facies, accumulated during continuing sea-level rise. The limit between the last aggrading sequence and the first retrograding sequence is identified as the transgressive surface, in the case it is not merged with the sequence boundary. Above this limit a facies association appears which is more external than below.

The transgressive systems tracts (TSTs) correspond to the period of maximal sea level rise. They are retrograding and the vertical change towards more and more external facies indicates the accumulation of deepening-upward parasequences. On the carbonate platform, the TSTs are also characterized by an increase in the thickness of the parasequences and by the presence of reworked sediments at their base as a consequence of platform flooding. The maximum flooding surface is placed at the top of this succession, composed of the external most facies.

The highstand systems tracts (HSTs) are composed of shallowing-upward parasequences characterized by a progressive decrease in their thickness and more and more proximal facies associations. At the base of the HSTs, when the relative sea level reaches its maximum, parasequences are aggradational. During subsequent sea-level fall, parasequences started to pro-

grade. The sequence boundaries (SBs) are defined at the top of the HSTs, on top of sediments characterized by internal facies. The presence of meteoric diagenetic features such as karst and early dissolution confirms the position of those stratigraphic surfaces.

These criteria allowed us to propose a general sequence-stratigraphic framework for the sections and wells studied, which were used to interpret and correlate the sections and to develop a depositional model of the Urgonian Formation for southeastern France (Bastide, in prep.). In general and in accordance with the sequence-stratigraphic model proposed by Arnaud (refs) for the Vercors and Chartreuse areas, three sequences (Ba3-5) were distinguished for the sediments of late Barremian age, and a further sequence for the sediments of earliest Aptian age (A1).

## 5.2 BIOSTRATIGRAPHY BASED ON BENTHIC FORAMINIFERA

For this project, we employed an updated version of the orbitolinid biostratigraphic chart established by Annie Arnaud-Vanneau for more than 20 sections in the Vercors and Chartreuse massifs (Arnaud-Vanneau, 1980; Arnaud et al., 1998, 2005). We added biostratigraphic information from 3883 samples covering the inner lagoon to the outer shelf of the Urgonian platform, taken from the sections studied in Vercors, Ardèche, Gard, Vaucluse and Provence. This new and significant data set confirmed most biostratigraphic distributions suggested in Arnaud-Vanneau (1980) and Arnaud et al. (1998, 2005) (i.e. for *Eopalorbitolina charollaisi*, *Cribellopsis neoelongata*, *Falsurgonina pileola*...), and other biostratigraphic distributions were precised (i.e. *Paracoskinolina maynci*, *Orbitolinopsis cuvillieri*, *Cribellopsis schroederi*...). In addition to the stratigraphic distribution of the orbitolinids, the biostratigraphic distribution of *Neotrocholina friburgensis* was taken into consideration. The occurrence of this benthic foraminifer is particularly useful to distinguish the last sequence of the late Barremian (Ba5) and the first sequence of the early Aptian (A1).

The benthic foraminiferal species considered for stratigraphic subdivision and their biostratigraphic distribution are listed in Fig. 6: It is not necessary to list the species separately. They are listed in Fig. 6

The benthic faunal assemblages and species distributions defined for the three sequences of the late Barremian (Ba3, Ba4 and Ba5) and the first two sequences of the early Aptian (A1 and A2) are the following:

LST, TST and HST Ba3: they are characterized by *Praedictyorbitolina carthusiana*,

*Eopalorbitolina charollaisi* and *Orbitolinopsis debelmasi*. Primitive forms of *Paracoskinolina reicheli* and *Palorbitolina lenticularis* were identified.

TST and HST Ba4: the typical species of Ba3 have disappeared. In this interval, most *Paracoskinolina* species (*P. sunnilandensis*, *P. maynci*, *P. reicheli* and *P. hispanica*) appear. They become larger in sequence Ba5.

TST and HST Ba5: they are characterized by an abundance of the high conical and the largest forms of *Neotrocholina friburgensis* and by the degree of evolution of *Paracoskinolina*. Moreover, several *Orbitolinopsis* species occur during the HST: *O. buccifer*, *O. pygmea*, *O. kili* and *O. briacensis*. These latter forms are rare in sequence Ba5, and become more evolved and abundant in Ap1.

TST and HST A1: this interval is identified by the total disappearance of large-sized *Neotrocholina* and by the abundance of *Orbitolinopsis*. *Palorbitolina lenticularis* becomes more and more frequent in the TST of sequence Ap1 until its MFS (known as “Lower Orbitolina Marl Member”).

TST and HST A2: they are dominated by the abundance of *Palorbitolina lenticularis* with an arenaceous test.



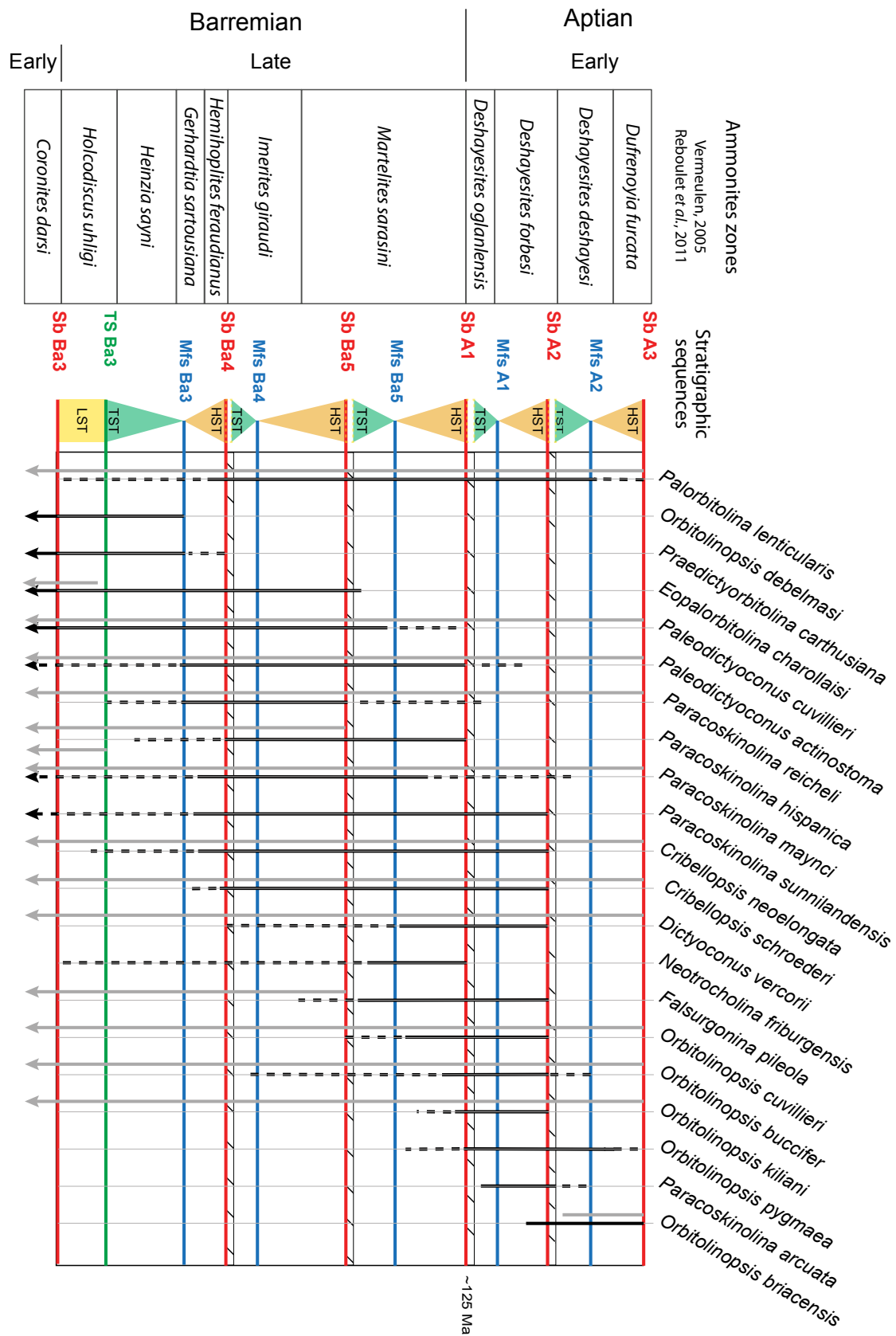


Figure 3-12 : Biostratigraphic chart mainly based on orbitolinid assemblages. Black lines : this study ; gray lines : biostratigraphic distribution from Arnaud *et al.*, 1998. Ammonite biozonation is based on Vermeulen (2006) for the Barremian, and on Reboullet *et al.* (2011) for the Aptian.

### **5.3 SEQUENCE STRATIGRAPHY, CARBON-ISOTOPE AND PHOSPHORUS CONTENTS IN THE SIX DEDICATED SECTIONS**

#### **5.3.1 THE NAN SECTION (VERCORS)**

The stratigraphic subdivision of the Nan section is based on the one interpreted by Arnaud et al. (1998). The section begins just below the sequence boundary of sequence Ba3 (Sb Ba3), and the youngest samples were dated as early Aptian and belong to sequence A1. The SB of sequence A1 (Sb A1) is well exposed in this section and corresponds to an irregular and erosive surface crosscutting several underlying beds.

In the Nan section, the  $\delta^{13}\text{C}$  values measured in sediments attributed to the HST of the Ba3 sequence (HST BA3) are negative. Those values correspond to a level where important diagenesis in the form of dolomitization and dedolomitization occurred. These repeated post-depositional mineral transformations may have shifted the  $\delta^{13}\text{C}$  record towards more negative values (Planteblat, 2013; Moss and Tucker, 1995).

#### **5.3.2 THE GORGES DE L'ARDÈCHE SECTION (ARDÈCHE)**

The sediment succession of the Gorges de l'Ardèche section represents almost the entire Urgonian series from the higher part of the LST of sequence Ba3 (LST Ba3) to the lower part of the HST of sequence A1 (HST A1).

#### **5.3.3 THE PONT DE LAVAL (ARDÈCHE)**

The LST, TST and HST of the Ba3 sequence compose the measured section.

The higher phosphorus content (1695 ppm) corresponds to a level where karst features were observed.

#### **5.3.4 THE ANGOSTRINES (GARD)**

The oldest samples analyzed were taken just below SB Ba3, in the upper part of the lower Barremian. This section is predominantly composed by the sequences Ba3 and Ba4. The highest samples were attributed to the TST of the sequence Ba5.

Only 19 out of 142 samples from the Angostrines section revealed positive  $\delta^{13}\text{C}$  values. In thin sections, the majority shows important porosity. Most foraminifera such as miliolids and orbitolinids are dissolved. Diagenesis likely affected the  $\delta^{13}\text{C}$  record of the Angostrines section. A trend can still be discerned along the section with the exception of the HST of sequence Ba3

where the  $\delta^{13}\text{C}$  record is too scattered.

#### 5.3.5 THE FONTAINE SECTION (VAUCLUSE)

The Fontaine section includes the top of the TST and the entire HST of sequence Ba4 (TST and HST Ba4), the entire Ba5 sequence, and the TST and the base of the HST of sequence A1 (TST and HST A1).

#### 5.3.6 THE CANDELLE SECTION (PROVENCE)

The base of the Candelle section is attributed to the Hauterivian and the upper part to the late Barremian. The age of approximately twenty meters between these two intervals has not been defined.

The Candelle section displays the lowest  $\delta^{13}\text{C}$  values of this study (up to -7 ‰).  $\delta^{13}\text{C}$  values below -4 ‰ were measured in entirely dedolomitized samples in which the original microfacies is not anymore distinguishable. The  $\delta^{13}\text{C}$  values between -4 ‰ and -1 ‰ correspond to samples with a less important effect of dolomitization and dedolomitization, and still distinguishable microfacies.

An increase in phosphorus contents is observed in the Hauterivian marly limestone at the base of this section.

## 6 DISCUSSION

### 6.1 VALIDITY OF THE $\delta^{13}\text{C}$ RECORDS

A selection of representative samples with different facies from different sections was microsampled at three distinct places per sample and analyzed for its  $\delta^{13}\text{C}$  record. The results (Table 2) show a mean standard deviation of 0.09‰. A maximal deviation of 0.17 ‰ was measured in a sample of the Pont de Laval section. The difference between the mean  $\delta^{13}\text{C}$  values measured on the microdrill powders and the  $\delta^{13}\text{C}$  values of the bulk samples is less than 0.11‰. These data suggests that the  $\delta^{13}\text{C}$  data obtained from bulk-rock analyses are representative and relevant.

Sections	Samples	Facies	$\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) (‰)	Mean (‰)	Standard deviation (‰)
Gorges de l'Ardèche	A 12-1	5	2,80	2,80	0,00
	A 12-3	5	2,80		
Gorges de l'Ardèche	R 90-2	3	1,55	1,62	0,07
	R 90-3	3	1,69		
Gorges de l'Ardèche	R 67-1	2	0,42	0,33	0,10
	R 67-2	2	0,23		
Gorges de l'Ardèche	A 63		0,47		
	A 63-1	2	0,56	0,36	0,14
	A 63-2	2	0,25		
	A 63-3	2	0,29		
Pont de Laval	PV 134		-058		
	PV 134-1	5	-0,92	-1,12	0,17
	PV 134-2	5	-1,11		
	PV 134-3	5	-1,32		
Angostrines	AG 86		-0,72		
	AG 86-1	5	-0,75	-0,64	0,13
	AG 86-3	5	-0,47		
	AG 86-2	5	-0,71		
Fontaine	F 256		2,38		
	F 256-1	5	2,21	2,36	0,11
	F 256-2	5	2,46		
	F 256-3	5	2,42		
Nan	GN 614		1,7		
	GN 614-1	5	1,69	1,66	0,03
	GN 614-2	5	1,67		
	GN 614-3	5	1,61		

Table 3-2 : Comparison of the  $\delta^{13}\text{C}$  (VPDB) values measured in the matrix

## 6.2 CORRELATION OF THE $\delta^{13}\text{C}$ RECORDS

The correlation of the  $\delta^{13}\text{C}$  records between the different sections is hampered by differences in thicknesses of the systems tracts, in the depositional environments and the resulting differences in the original  $\delta^{13}\text{C}$  signal, in the diagenetic overprint, and in the amount of eroded sediment underneath SBs (Fig. 13). To facilitate their correlation, the  $\delta^{13}\text{C}$  records were plotted against time (Fig. 14). The maximum-flooding and transgressive surfaces, and the sequence boundaries were considered as time-equivalent and were used as tie points in each section. It should be noted that this approach is based on the assumption that our sequence stratigraphic interpretations and their age attributions are correct.

Due to the location of the sections and to the progradation of the platform toward the basin, LSTs younger than that of sequence Ba3 were not identified. This implies that the corresponding periods and their  $\delta^{13}\text{C}$  records were not recorded on the platform. Even if some records or parts of records show diagenetically influenced, decreased values, meaningful trends are still preserved. This seems also be the case for the Angostrines section, where the shift induced by diagenesis is rather constant, with the exception of the HST of sequence Ba3 where  $\delta^{13}\text{C}$  values are too scattered to distinguished a specific trend.

A clear diagenetic impact is also seen in the  $\delta^{13}\text{C}$  record of the interval underneath the SB of sequence Ba4 in the Nan section, where karstification, dolomitisation and dedolomitisation are important phenomena (Moss et al., 1995 ; Planteblat et al., in prep.). The same diminishing trend is observed in the HST of sequence Ba4 in the Fontaine section, where a diagenetic impact is also responsible for this negative shift in  $\delta^{13}\text{C}$ . This is confirmed by an analysis of the corresponding thin sections, in which dissolution features were observed.

A positive correlation of shorter-term variations in the  $\delta^{13}\text{C}$  records is seen for sequence Ba3 in the sections of the Gorge d'Ardèche and Pont de Laval, and to a lesser degree of the sections of Angostrines and Candelle. The  $\delta^{13}\text{C}$  records of sequence Ba4 are rather well correlated between the sections of Nan, Fontaine, and Angostrines with the exception of the period during which the maximum flooding surface was formed. The section of the Gorge d'Ardèche has too few data points for this time period to be positively correlated. The  $\delta^{13}\text{C}$  records of sequence Ba5 are well correlated between all sections covering this period, and especially the negative excursion associated with the maximum flooding surface shows up in all sections. Also the

$\delta^{13}\text{C}$  records of sequence A1 are well comparable between all sections concerned, and also here, the prominent negative excursion just above the maximum flooding surface is present in all sections.

The correlation of the long-term trends in the  $\delta^{13}\text{C}$  records and the  $\delta^{13}\text{C}$  reference curves seems possible for the sequences Ba3 and Ba4 which show a long-term tendency towards more positive values. The correlation for sequence Ba5 is less evident, but the long-term trend for sequence A1 is better correlated with the reference records, with increasing and decreasing values for its TST and HST, respectively (Fig. 14).

The consistency between the stratigraphic subdivisions and the  $\delta^{13}\text{C}$  records confirm the reliability of the microfacies and sequence-stratigraphic interpretations and the biostratigraphic chart used in this study. They substantiate an early late Barremian age for the onset of Urgonian platform growth in southeastern France, with the exception of the Provence area, where Urgonian-type sediments were already deposited during the Hauterivian, and following a hiatus for the early Barremian, a second phase occurred during the late Barremian.

### **6.3 PHOSPHORUS RECORDS**

The phosphorus records show very low values for proximal platform sediments (generally below 40 ppm), whereas distal platform and outer-shelf sediments display higher values (up to 80 and more ppm). These values are generally low and suggest that the Urgonian platform developed under oligotrophic conditions (Stein et al., 2012). This is also seen in the general long-term trend towards lower phosphorus values with the progressive installation of the Urgonian platform during the late Barremian.

Phosphorus contents near the maximum flooding surface of sequence A1 are variable but generally lower than those measured in the Swiss Helvetic Alps (Stein et al., 2012). This interval corresponds to the “Lower Orbitolina Member”, composed of a more or less marly bed, characterized by the abundance of *Palorbitolina lenticularis*.

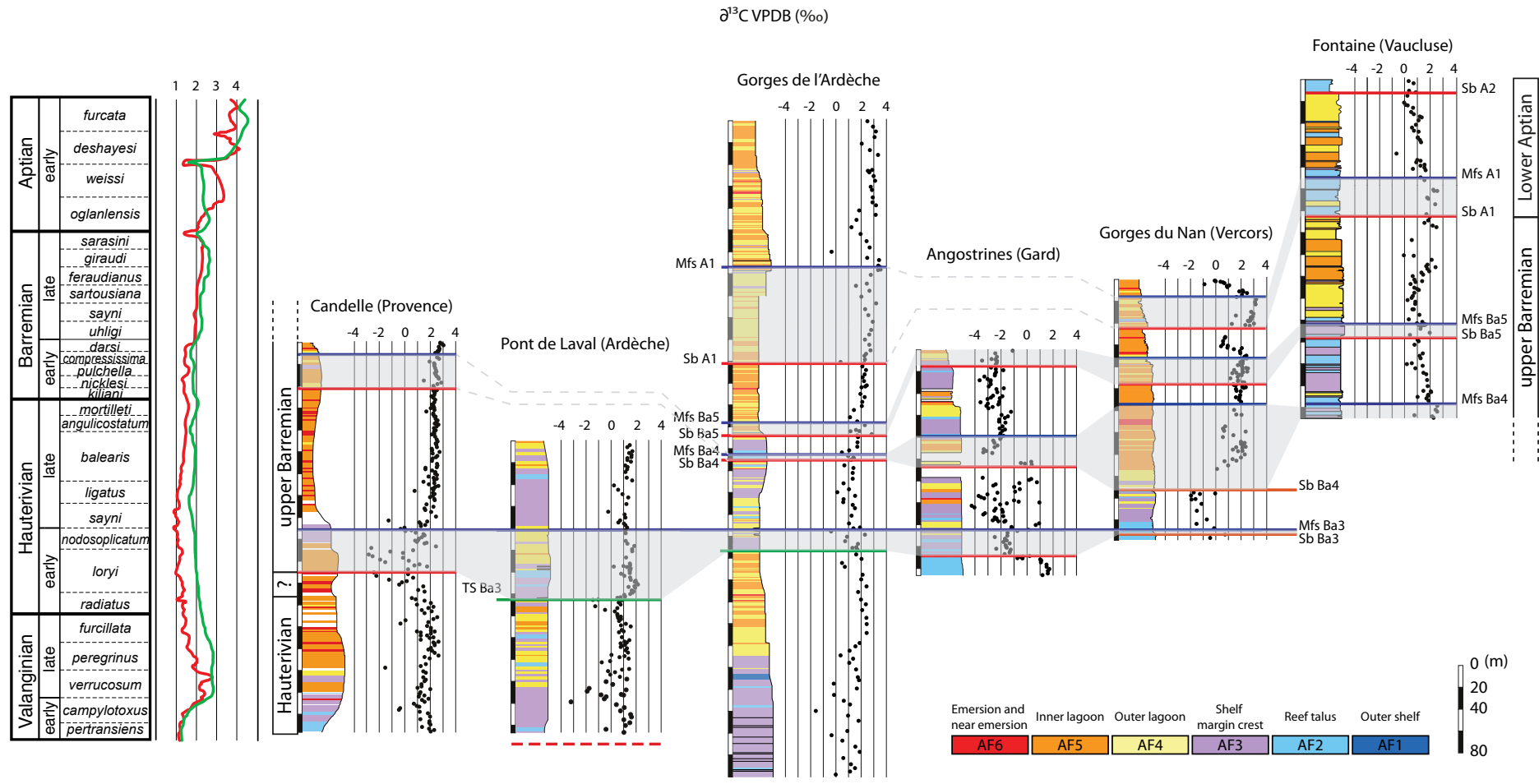


Figure 3-13 : Correlation of the  $\delta^{13}\text{C}$  signals of the different sections. The thicknesses of the sections are respected and at a same scale.

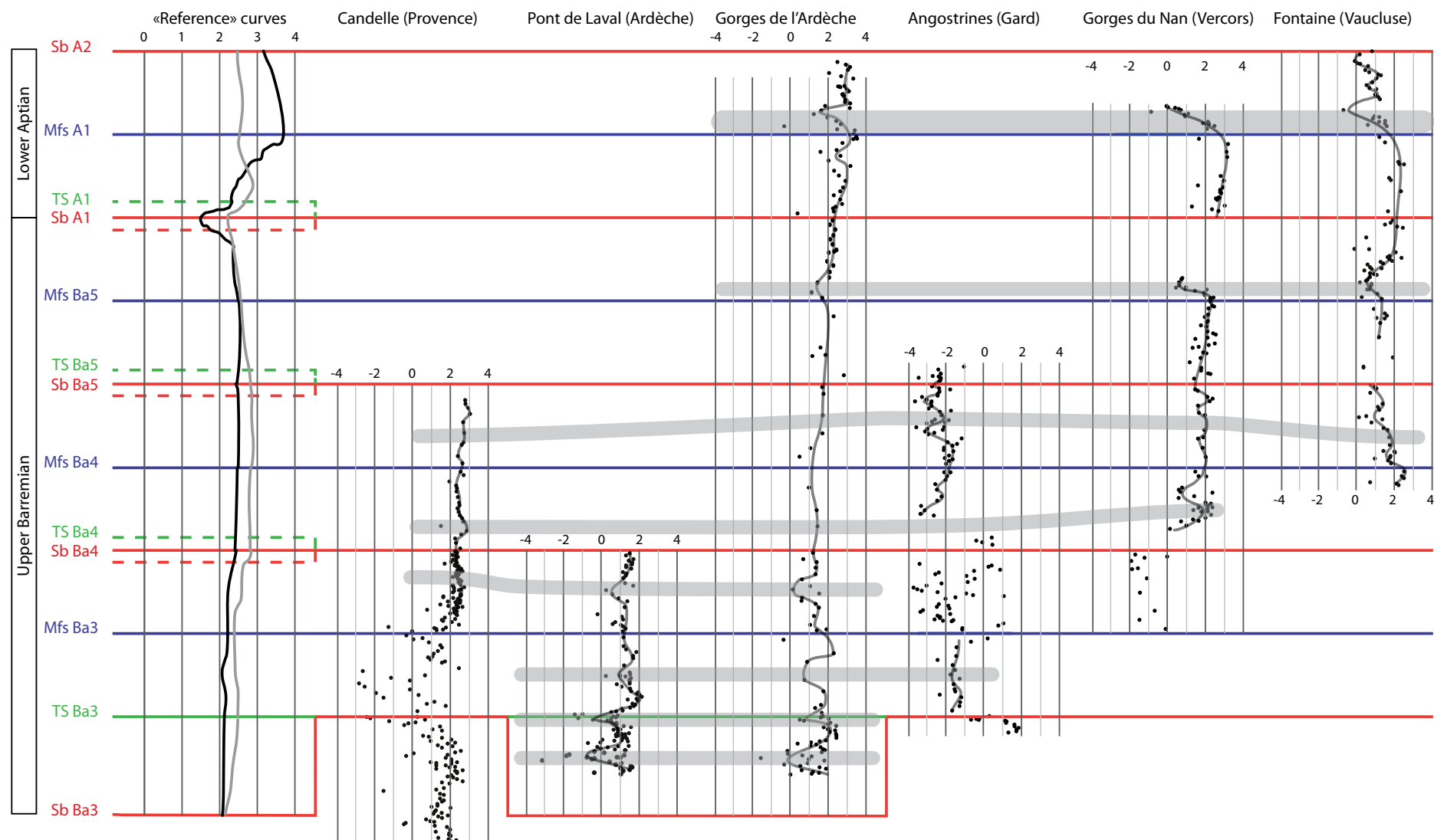


Figure 3-14 : Correlation of the  $\delta^{13}\text{C}$  signals of the different sections against time. Reference curves from Föllmi, 2012: gray curve after Sprovieri et al. (2006); black curve after Emmanuel and Renard (1993), Hennig et al. (1999), Van de Schootbrugge et al. (2000), Herrle et al. (2004), Godet et al. (2006) and Föllmi et al. (2006).



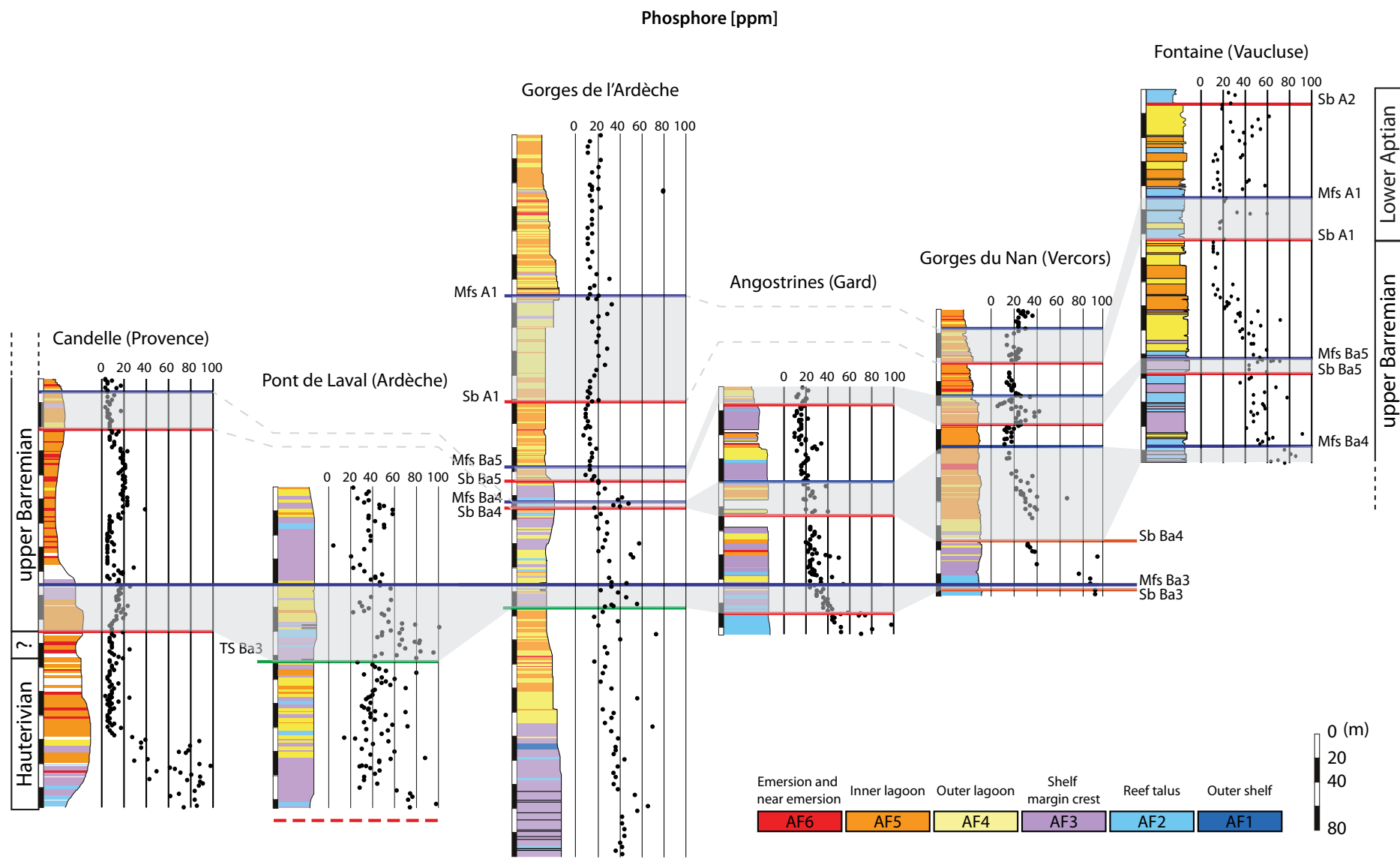


Figure 3-15 : Comparison of the Phosphorus concentration signals of the different sections.

## 7 CONCLUSIONS

52 sections and wells through the Urgonian Formation from five main sectors around the Vocontian Basin - Vercors, Ardèche, Gard, Vaucluse and Provence, in southeastern France were studied with regards to their facies, microfacies and biostratigraphy. Six sections representative of the five regions (Gorges du Nan, Gorges de l'Ardèche, Pont de Laval, Angostrines, Fontaine and Candelle) were selected for an analyses of their  $\delta^{13}\text{C}$  and phosphorus records. The different microfacies types were grouped into six microfacies associations, which cover the proximal platform to the outer shelf beyond the platform margin. Stratigraphic trends in microfacies associations were combined with field observations to interpret the sections and wells with regards to their sequence stratigraphic architecture. An updated biostratigraphic chart based on benthic foraminifera was used to infer the ages. Recognized was a Hauterivian onset in Urgonian-type sedimentation in the Provence region, whereas in the other regions, the appearance of Urgonian sediments is dated as late Barremian. In the Provence area, the Hauterivian Urgonian sediments are overlain by upper Barremian Urgonian sediments, thereby including a hiatus covering most of the early Barremian. Three sequences of late Barremian age (Ba3-5) and one sequence of early Aptian age (A1) were identified.

With the exception of diagenetically strongly overprinted intervals, the short-term trends in the  $\delta^{13}\text{C}$  records correlate mostly positively between the sections, thereby confirming the sequence-stratigraphic model proposed. Long-term trends are comparable to the reference  $\delta^{13}\text{C}$  records from the Vocontian and Italian basins, with the exception of the latest Barremian.

The phosphorus record indicate generally low values, with proximal platform facies having the lowest values (generally not more than 40ppm). The sections also show a trend towards lower values with the evolution of the Urgonian platform. This indicates oligotrophic conditions during platform development.

The approach used here confirms previous models, in which the Urgonian platform of the northern Tethyan margin developed during the late Barremian and the earliest Aptian (with the exception of the Provence region), in a period, which is generally considered to be favorable for platform development and in which Urgonian-type carbonate was deposited in the subtropical and tropical shallow-water areas on a global scale.

## REFERENCES











- Adatte, T., Arnaud Vanneau, A. Arnaud, H., Blanc-Alétru, M. C., Bodin, S., Carrio-Schaffauser, E., Föllmi, K., Godet, A., Chaker Raddadi, M., Vermeulen, J. (2005). «The Hauterivian-Lower Aptian sequence stratigraphy from Jura platform to Vocontian basin: A multidisciplinary approach.» *Géologie Alpine. Série Spéciale «Colloques et Excursions»* N°7, p. 181.
- Ager, D. V. (1981). *The Nature of the Stratigraphical Record*, Second Edition, Macmillan.
- Al Ghamdi, N., Read, F. J., 2010. Facies-based sequence stratigraphic framework of the Lower Cretaceous rudist platform, Shu'aiba Formation, Saudi Arabia, In: F.S.P. van Buchem, M.I. Al Hussein, F. Maurer and H.J. Droste (Eds.), *Barremian-Aptian stratigraphy and hydrocarbon habitat of the eastern Arabian Plate. GeoArabian Spec. Publ. 4*, Gulf Petrolink, Bahrain, 2, 367-410.
- Amthor J., Kerans, C. and Gauthier, P., 2010. Reservoir characterisation of a Shu'aiba carbonate ramp-margin field, northern Oman. In: F.S.P. van Buchem, M.I. Al Hussein, F. Maurer and H.J. Droste (Eds.), *Barremian-Aptian stratigraphy and hydrocarbon habitat of the eastern Arabian Plate. GeoArabian Spec. Publ. 4*, Gulf Petrolink, Bahrain, 2, 549-576
- Arnaud H. (1981). De la plate-forme urgonienne au bassin vocontien : le Barrémo-Bédoulien des Alpes occidentales entre l'Isère et le Büech (Vercors méridional, Diois oriental et Dévoluy). Thèse, Grenoble ; *Géologie Alpine*, Grenoble, *Mém. H.S.*, n° 12, 3 vol., p. 804
- Arnaud-Vanneau A. (1980).- Micropaléontologie, paléoécologie et sédimentologie d'une plate-forme carbonatée de la marge passive de la Téthys : l'Urgonien du Vercors septentrional et de la Chartreuse (Alpes occidentales).- Thèse, Grenoble ; *Géologie Alpine*, Grenoble, *Mém. H.S.*, n° 11, 874 p.
- Arnaud, H. (2005) The South-East France basin (SFB) and its Mesozoic evolution, *Géologie Alpine. Série spéciale «colloque et excursions»* n°7.
- Arnaud, H., Arnaud-Vanneau, A., Blanc-Alétru, M.C., Adatte, T., Argot, M., Delanoy, G., Thieuloy, J.P., Vermeulen, J., Virgone, A., Virlouvét, B., Wermeille, S. (1998). «Répartition stratigraphique des orbitolinidés de la plate-forme urgonienne subalpine et jurassienne (SE de la France).» *Géologie Alpine* 74: 3-89.

- Borgomano, J. R. F, Masse, J-P. and Al Maskiry, S., (2002) The lower Aptian Shu'aiba carbonate outcrops in Jebel Akhdar, northern Oman: impact on static modelling of Shu'aiba petroleum reservoirs. AAPG Bull., 86 (9), 1513-1529.
- Charollais J., Clavel B., Schroeder R., Busnardo R. & Masse J.-P. (1998). La plate-forme urgoniennne. Un exemple de plate-forme carbonatée : biostratigraphie, stratigraphie séquentielle, sédimentologie, études régionales. Publications du Département de Géologie et Paléontologie, Université de Genève, (Série «Guide géologique»), n° 8, p. 181.
- Clavel B., Busnardo R., Charollais J., Conrad M., Granier B. (2009). Nouvelles données sur la répartition des Orbitolinidés à l'Hauterivien supérieur, au Barrémien et à l'Aptien inférieur dans le Sud Est de la France et le Jura Franco-Suisse. Arch. Sci (2009) 62 : 125-146.
- Conrad, M., Clavel,B., Granier, B., Charollais, J., Busnardo, R., Erba, E., Gardin, S., Jan du Chêne, R., Decrouez, D., Cherchi, A., Schroeder, R., Sauvagnat, J., Weidmann, M. (2011) «Discussion of: Stratigraphic, sedimentological and palaeoenvironmental constraints on the rise of the Urgonian platform in the western Swiss Jura, by A. Godet *et al.*, Sedimentology (2010) 57, 1088-1125.» Sedimentology.
- Eaton, A.D., Clesceri, L.S., Greenberg, A.E. (1995) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (19th edition).
- Emmanuel, L., Renard, M., 1993. Carbonate geochemistry (Mn,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\text{d}^{18}\text{O}$ ) of the late TithonianeBerriasian pelagic limestones of the Vocontian trough (SE France). Bulletin de Centre de Recherches et Exploration-Production. Elf-Aquitaine 17, 205-221.
- Föllmi, K. B. (2012). Early Cretaceous life, climate and anoxia. Cretaceous Research, 35, 230-257.
- Föllmi, K.B., Godet, A., Bodin, S., Linder, P., 2006. Interactions between environmental change and shallow-water carbonate build-up along the northern Tethyan margin and their impact on the early Cretaceous carbon-isotope record. Paleooceanography 21, doi:10.1029/2006PA001313.
- Godet, A., Bodin, S., Föllmi, K.B., Vermeulen, J., Gardin, S., Fiet, N., Adatte, T., Berner, Z., Stüben, D., van de Schootbrugge, B., 2006. Evolution of the marine stable carbon-isotope

- record during the early Cretaceous: a focus on the late Hauterivian and Barremian in the Tethyan realm. *Earth and Planetary Science Letters* 242, 254-271.
- Godet, A., Föllmi, K. B., Bodin, S., de Kaenel, E., Matera, V., Adatte, T. (2010). «Stratigraphic, sedimentological and palaeoenvironmental constraints on the rise of the Urgonian platform in the western Swiss Jura.» *Sedimentology* 57(4): 1088-1125.
- Godet, A., Föllmi, K. B., Bodin, S., de Kaenel, E., Matera, V., Adatte, T., Arnaud-Vanneau, A., Arnaud, H., Vermeulen, J. (2012). «A Late Barremian age for the onset of Urgonian-type facies in the Swiss Jura Mountains. Reply to the discussion by Conrad *et al.* on «Stratigraphic, sedimentological and palaeoenvironmental constraints on the rise of the Urgonian Platform in the western Swiss Jura» by Godet *et al.* (2010), *Sedimentology*, 57, 1088-1125.»
- Goguel J. (1932) « Sur l'extension des faciès urgoniens dans les Monts de Vaucluse » *Bull. Soc. Géol. Fr.*, Paris, (5), t. II, p.445-464.
- Hennig, S., Weissert, H., Bulot, L., 1999. C-isotope stratigraphy, a calibration tool between ammonite- and magnetostratigraphy: the Valanginian-Hauterivian transition. *Geologica Carpathica* 50, 91-96.
- Herrle, J.O., Kössler, P., Friedrich, O., Erlenkeuser, H., Hemleben, C., 2004. High-resolution carbon isotope records of the Aptian to lower Albian from SE France and the Mazagan Plateau (DSDP Site 545): a stratigraphic tool for paleoceanographic and paleobiologic reconstruction. *Earth and Planetary Science Letters* 218, 149-161.
- Kilian W. (1912) « Sur une carte de répartition du faciès « Urgonien » dans le Sud-est de la France » *Assoc. Fr. Avanc. Sci.*, Nîmes (1912), p. 361-375, 1 fig.
- Masse J.-P. (1976) Les calcaires urgoniens de Provence Valangienien-Aptien inférieur. Thèse. Marseille, Université Aix-Marseille II, 1976, 255.
- Masse, J. P., Gourrat, C., Orbette, D., & Schmuck, D. (1998). Hauterivian rudist faunas of Southern Jura (France). *Geobios*, 31, 225-233.
- Moss, S. and Tucker, M. E. (1995) Diagenesis of Barremian-Aptian platform carbonates the Urgonian limestone formation of SE France: near-surface and shallow-burial diagenesis, *Sedimentology*, Vol. 42, 853-873.

- Orbigny A. (1847-1849)-Paléontologie française. Terrain crétacés IV. Masson ed. Paris
- Planteblat, C., Arnaud-Vanneau, A., Adatte, T., Föllmi, K.B., Virgone, A., Bouillier, A.M., Massonnat, G. (2012) “Dolomitization-dedolomitization events in the Urgonian Platform (Upper Barremian), southeastern France”, *Sedimentary Geology* (in progress) .
- Reboulet, S., Rawson, P. F., Moreno-Bedmar, J. A., Aguirre-Urreta, M. B., Barragán, R., Bogomolov, Y., ... & Szives, O. (2011). Report on the 4th International Meeting of the IUGS Lower Cretaceous Ammonite Working Group, the “Kilian Group”(Dijon, France, 30th August 2010). *Cretaceous Research*, 32(6), 786-793.
- Sprovieri, M., Coccioni, R., Lirer, F., Pelosi, N., Lozar, F., 2006. Orbital tuning of a lower re-taceous composite record (Maiolica Formation, central Italy). *Paleoceanography* 21, PA4212.
- Steuber, T., Rauch, M., Masse, J. P., Graaf, J., & Malkoč, M. (2005). Low-latitude seasonality of Cretaceous temperatures in warm and cold episodes. *Nature*, 437(7063), 1341-1344.
- Van de Schootbrugge, B., Föllmi, K.B., Bulot, L.G., Burns, S.J., 2000. Paleoclimatographic changes during the Early Cretaceous (Valanginian-Hauterivian): evidence from oxygen and carbon stable isotopes. *Earth and Planetary Science Letters* 181,15-31.
- Vermeulen, J. (2005) Boundaries, ammonite fauna and main subdivisions of the stratotype of the Barremian. *Géologie Alpine. Série spéciale «colloque et excursions»* n°7.

## ANNEXES :

	Large rudist		Grainstone		Marly limestone
	Small rudist		Oolite		Marls
	Coral		Shelf debris		Karst
	Branching coral		Oncolite		Root trace
	Gastropod		Tempestite		fractured zone
	Annelid		Silex		Irregular surface
	Flat Orbitolina		Bioturbations		Onlap

Annexe 1: Legend of the Figures from Figure 3-6, p. 85 to Figure 3-11, p. 90.







# Chapitre 4 :

## Données, interprétations et implications.

### Résumé :

Ce chapitre présente les données sédimentologiques et biostratigraphiques qui ont été récoltées dans les différents secteurs du Sud-Est de la France.

A partir de ces données, des corrélations en deux dimensions, puis en trois dimensions ont été réalisées afin de déterminer l'organisation de l'Urgonien secteur par secteur, puis à l'échelle du Sud-Est de la France.

Un réseau de failles subméridiennes et d'orientation N 110° a ainsi été mis en évidence. Trois failles subméridiennes délimitent trois blocs dans le secteur du Vercors. Six blocs basculés, dans lesquels l'Urgonien se développe en éventail, divisent la plateforme urgonienne au sud du Bassin Vocontien.

En intégrant l'ensemble des données acquises, des cartes d'épaisseurs de chaque cortège sédimentaire ont été dessinées et des cartes de paléoprosfondeur d'eau ont été réalisées au niveau de chaque limite stratigraphique.

Dans ce chapitre vont être détaillées, par secteur, les données obtenues et interprétées en termes d'évolution de la plateforme. La localisation des secteurs du Sud-Est de la France sont représentées Figure 4-1, p. 112.



Figure 4-1 : Carte de localisation des différents secteurs situés sur le pourtour du bassin Vocontien, dans le Sud-Est de la France.

Le tableau ci-dessous rassemble les coordonnées des coupes et puits répartis dans l'ensemble du Sud-Est de la France.

	X	Y	Z
Aiguèze	776949	1925417	150
Angostrines	752398	1904546	559,5
Apt	850280	1880110	249
Autridge	769896	1931342	280
Aven de Cal	752443	1910358	277
Aven de l'Agas	760273	1916512	318,4
Barjac	762075	1924880	260
Belvezet	759828	1901903	321
Candelle	854673	1806081	464
Chames	768077	1934345	415
Cire_Nesque	839760	1898622	853
Col de Lachau	838549	1994176	1000
Col de la Serre	755628	1930544	473
Collias	772511	1885972	147
Collias 2	770674	1885589	80
Combas	744022	1875056	600
Connaux	781862	1901643	90
Devenson	855453	1805611	300
Flaux	774220	1893243	300
Flaux 2	774220	1893243	180
Font Vive	755737	1933072	330
Fontaine	825154	1883528	255
Fontarèche	766378	1903833	264
Gorges du Nan	843214	2022898	678
Goudes	846383	1805645	400
La Baume 2	768579	1883993	300
La Nesque	837219	1899348	525
Le Blanquau	778381	1902779	256
Le Garn	771186	1925011	265
Lembarnes	769243	1904295	263,5
Les Fogés	828074	2000761	790
Mont Bouquet	756230	1906270	937
Navacelles	752417	1909177	230
Orgon	817020	1869240	98
Pont de Laval	769876	1936027	500
Port-Miou	859107	1806152	56
Route amont du Fâ	840144	2017325	994
Rouvière	773819	1928259	271
Rustrel	854515	1885590	512
Sagries	768704	1888850	65
Saint Anastasie	759613	1884021	171
Saint Marcel	776355	1927551	100
Saint Maximin	769860	1890372	130
Sauzet	749833	1885082	575
Serrou	767617	1932909	330
Serviers	761758	1894204	170
St Vincent la Cmderie	820588	1996547	300
Tunnel du pas du Mortier	854855	2031722	1100
Uzes	769199	1891984	183
Verfeuil	768794	1909727	145
Viviers gare	786909	1944307	110
Viviers Saint Montant	787099	1942824	110

Tableau 4-1 : Coordonnées, en Lambert II étendu, des coupes et puits étudiés dans le cadre de cette étude.

Pour chacun d'entre eux, un log sur lequel sont représentées l'ensemble des données ainsi que leur interprétation stratigraphique a été dessiné. Ces logs sont visibles en Annexe, paragraphe A1, de la page VIII à la page LXXX.

Pour les coupes, sont représentées de gauche à droite : un profil d'érosion sur lequel la macro-faune observée sur le terrain ainsi que les limites de bancs ont été représentés ; la position des échantillons prélevés ; le micro faciès observé en lame mince ; l'interprétation de la répartition des associations de faciès sur l'ensemble de la coupe ; le découpage stratigraphique déterminé ; et la micro-faune observées en lame mince.

L'observation des lames minces permet d'attribuer à chaque échantillon un microfaciès. Ces données sont donc des données ponctuelles. Une interprétation sur la répartition des faciès entre les échantillons est nécessaire pour colorier l'intégralité de la coupe en faciès. Ces interprétations sont basées sur :

- la géométrie des bancs, les changements de faciès se font principalement au niveau des limites de banc.

- sur les principes de stratigraphie séquentielle : dans une paraséquence, les faciès les plus externes se trouvent à la base, sauf s'il s'agit de paraséquences cycliques, auquel cas le faciès le plus externe se trouvera au milieu de la paraséquence.

- sur les observations de terrain : texture de la roche, macrofaune, figures sédimentaires...

Pour les puits, sont représentés de gauche à droite : l'épaisseur de calcaire forée par échantillon de boue de forage prélevée ; le micro-faciès observé en lame mince ; le découpage stratigraphique déterminé ; et la micro-faune observée en lame mince.

L'ensemble des déterminations de la micro-faune observée en lame mince a été validé par A. Arnaud-Vanneau.

# 1 LE GARD

## 1.1 LES DONNÉES

Cette région fut la première étudiée. Comme détaillée dans le paragraphe 6 du chapitre 2, p 64, elle fut l'objet d'une étude multidisciplinaire, préalable à celle-ci, déjà dirigée par G. Massonnat. Les données de cette première étude ayant été intégrée à celle-ci, elles font du Gard le secteur le plus renseigné. 8 coupes et 15 puits, répartis sur l'ensemble du secteur ont été échantillonnés et étudiés (cf. Figure 4-2, p. 115). 1427 échantillons et cuttings ont ainsi été récoltés, à partir desquels autant de lames minces ont été fabriquées. Au total, ces 23 coupes et puits représentent 3768 mètres de série urgonienne. Un log a été dessiné pour chaque coupe et chaque puits, ils sont visibles en annexe, paragraphe A1, de la page VIII à la page XXXVI.

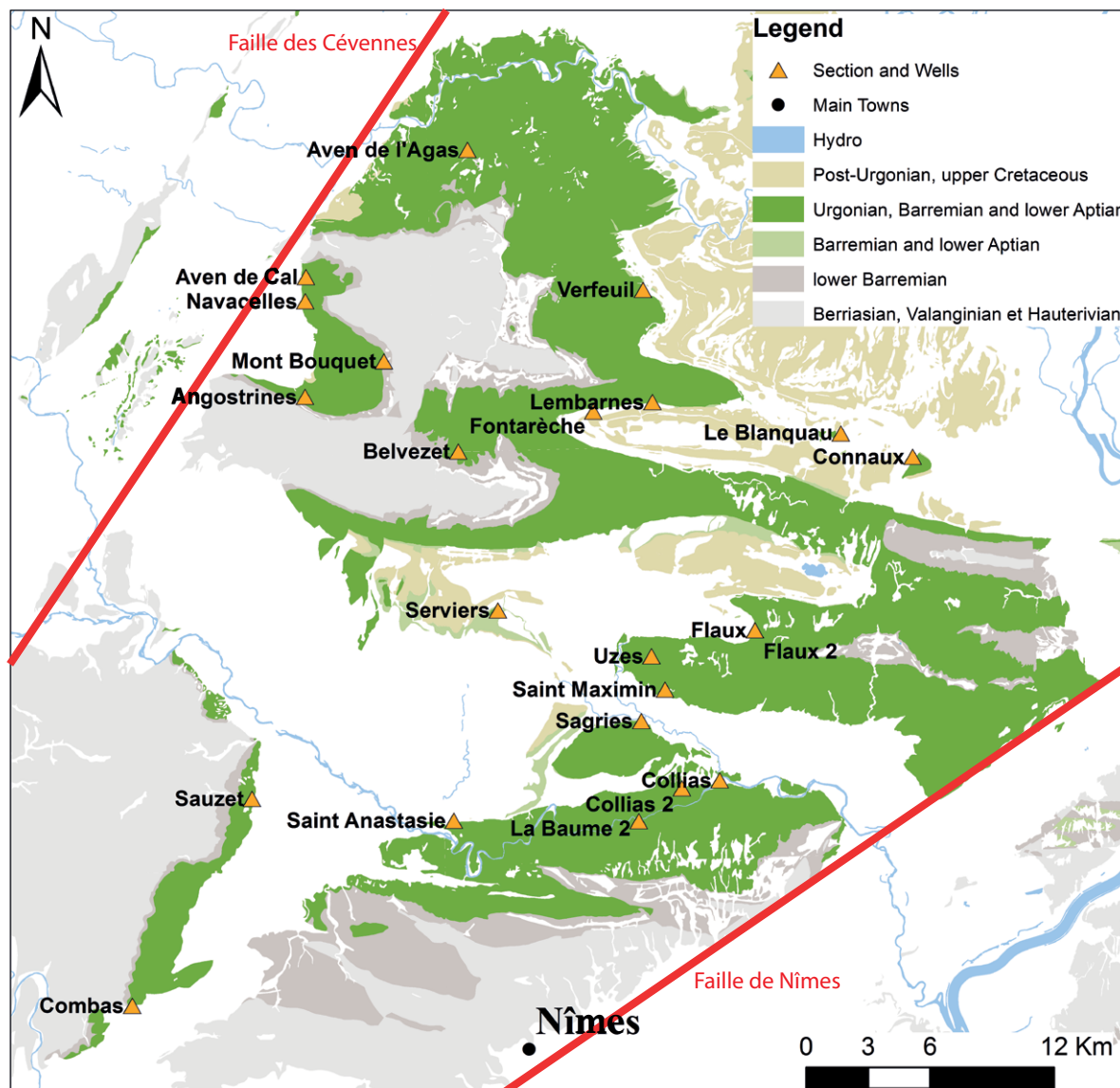


Figure 4-2 : Carte de localisation des coupes et puits dans le secteur du Gard

La plupart de ces coupes et puits ont été étudiés par D. Duchamp (Ajilon engineering) qui détermina, avec l'expertise d'A. Arnaud-Vanneau, la micro-faune urgonienne. Elle décrit également les microfacies selon un modèle de faciès spécialement conçu pour l'étude du secteur du Gard.

Afin d'intégrer ces données sédimentologiques à cette nouvelle étude d'échelle régionale, l'ensemble des lames minces fabriquées à partir des échantillons et cuttings ont été observées de nouveau. Un micro-faciès, défini dans le modèle créé spécifiquement pour l'étude de l'Urgonien du Sud-Est de la France (cf. chapitre 3, paragraphe 3.3, p. 78), a été attribué à chacun d'eux. Cette réattribution a permis la validation et parfois l'ajustement des positions des surfaces stratigraphiques. Il n'est question que d'ajustements car les déterminations de micro-faunes, contraignant l'attribution stratigraphique, étaient validées par la même experte que celle consultée dans le cadre de cette étude (Annie Arnaud-Vanneau) et n'ont donc pas été révisées. L'étude des cuttings ne permettant pas toujours une attribution évidente des microfaciès, ce sont surtout aux puits que se sont opérés ces ajustement.

Seule la coupe des « Angostrines » a été ré-échantillonnée entièrement. Cette coupe est localisée dans une ancienne carrière (où le calcaire était chauffé pour obtenir de la chaux). L'escarpement de ces parois ne facilitant pas l'échantillonnage, l'interprétation stratigraphique de cette coupe était restée incertaine. L'intégralité de la série urgonienne a été ré-échantillonnée, dont deux sections en rappel le long des deux principales falaises creusées dans cette carrière (cf. Figure 4-3, p. 117). Ce ré-échantillonnage continu a permis une interprétation stratigraphique cohérente observable en annexe p. xi. Peu d'espèces d'Orbitolinidés ont pu être déterminées en raison de la forte dissolution ayant affecté cet affleurement. Néanmoins, les rares espèces déterminées, la succession des faciès ainsi que les observations de terrain (notamment la géométrie des bancs), ont permis de déterminer la position des surfaces remarquables.

En effet, la limite de séquence Ba3 se repère sur le terrain par son irrégularité, par la géométrie des bancs sus et sous-jacents et par la présence de plusieurs poches karstiques sous cette limite (cf. Figure 4-3, p. 117). Son âge est en accord avec l'ammonite *Heinzia caicedi*, trouvée juste sous les premières couches urgoniennes, attribuée à la fin du Barrémien inférieur, début du Barrémien supérieur (de Brun *et al.*, 1916). La surface d'inondation maximum de cette séquence est placée dans le niveau présentant le faciès le plus externe, riche en échinodermes et bryozoaires. La position exacte de la limite de séquence Ba4 reste inconnue. Elle est supposée dans



une lacune de visibilité. Cette lacune a été interprétée comme étant, au moins en partie, due à la présence de niveaux « fragilisés » ayant subi une diagénèse plus ou moins importante, comme celle souvent observée au niveau des limites de séquences. La présence de poches karstiques dans les niveaux situés juste sous cette lacune confirme cette hypothèse (cf. Figure 4-3, p. 117). La surface d'inondation maximum de la séquence Ba4 est placée dans un des niveaux les plus externes, riche en foraminifères circalittoraux. La limite de la séquence Ba5 est située au dessus d'un niveau à tempestite et forme un replat dans la falaise (cf. Figure 4-3, p. 117).

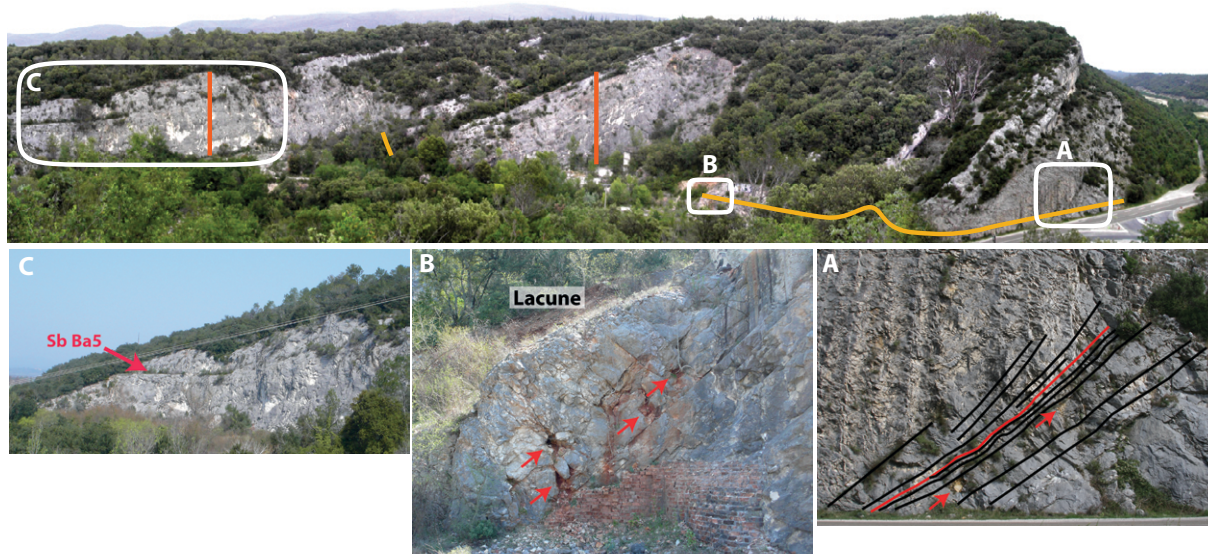


Figure 4-3 Panorama de la coupe des Angostrines, les traits oranges représentent les deux falaises levées en rappel, les traits jaunes, le reste de la coupe levée au sol. Sur les images notées A et B, les flèches rouges indiquent la position de poches karstiques, le trait rouge, la limite de séquence Ba3 et les traits noirs, les limites de bancs sous et sus-jacents. Sur l'image notée C, la flèche rouge indique la position de la limite de séquence Ba5.

## 1.2 INTERPRÉTATIONS

Suite à cette nouvelle étude sédimentologique, les corrélations des coupes et puits du secteur du Gard ont été redessinées. Ces nouvelles corrélations ne remettent pas en question le modèle en blocs basculés démontré lors de la première étude du secteur du Gard (cf, chapitre 2, paragraphe 6, p. 64).

La Figure 4-4, p. 118 illustre la corrélation des surfaces remarquables le long d'un transect nord-est - sud-ouest. Du nord au sud, on peut observer l'épaississement des cortèges sédimentaires qui peut atteindre un facteur 10 et le dépôt de faciès de plus en plus externes entre le puits de Blanquau et de Collias 2. Au nord du puits de Blanquau, le puits de Verfeuil montre à nouveau des épaisseurs plus importantes. De la même manière, au sud du puits de Collias 2, le puits de Sauzet montre une épaisseur réduite du cortège transgressif de la séquence Ba3. Un nouvel épaississement peut ensuite être observé entre ce dernier puits et la coupe de Combas au sud.



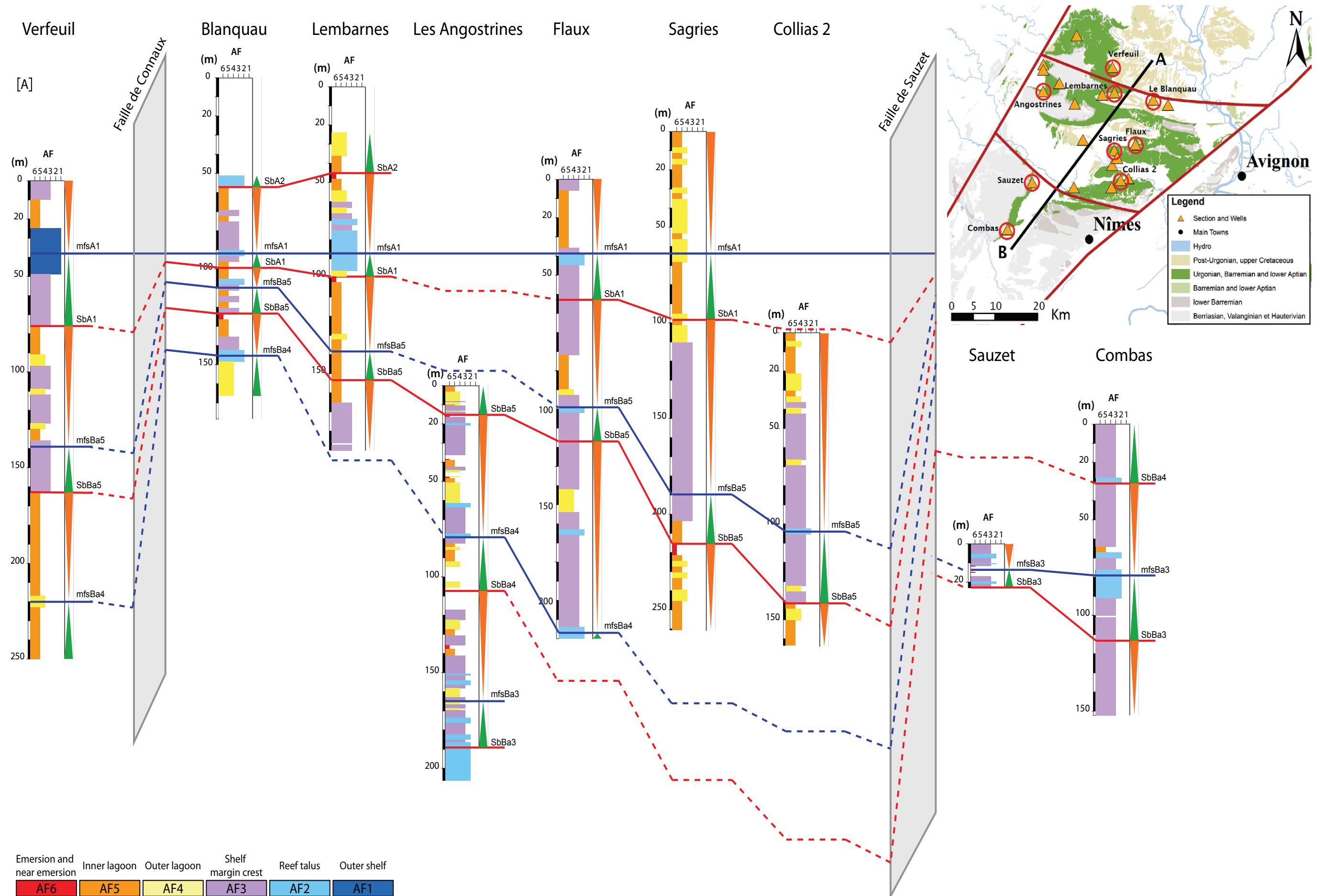


Figure 4-4 : Corrélation de plusieurs coupes et puits du secteur du Gard. Les rectangles gris représentent les failles d'orientation N110° délimitant les blocs basculés.

Toutes ces observations sont cohérentes avec la présence des failles, de direction N110°, de Connaux et de Sauzet délimitant des blocs basculés et régissant la géométrie et les faciès de la série urgonienne (cf. Figure 4-5, p. 119). A l'ouest et à l'est, les blocs sont délimités par la faille des Cévennes et la faille de Nîmes.

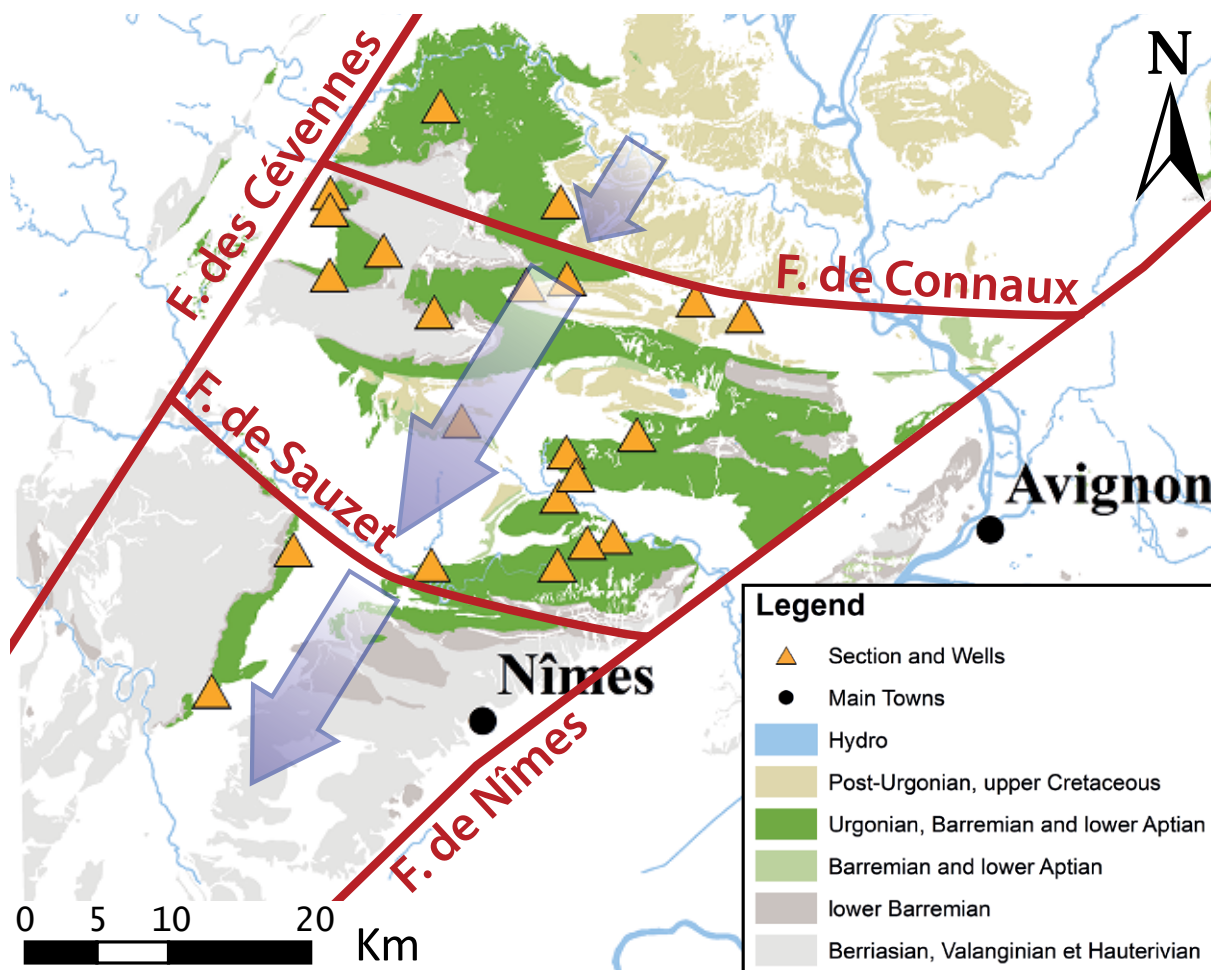


Figure 4-5 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien du Gard. Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés. Les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles

## 2 L'ARDÈCHE

L'Ardèche fut le deuxième secteur à être étudié. Il est le prolongement vers le Nord du secteur du Gard. D'un point de vue paléogéographique, l'Ardèche se situe sur la bordure de plateforme et assure le passage de la plateforme urgonienne au bassin Vocontien (cf. Figure 4-1, p. 112).

Deux objectifs principaux ont guidé l'étude de cette zone. Le premier était d'observer et de caractériser le passage plateforme-bassin. Le second était de déterminer si la structure en blocs basculés identifiée dans le Gard se poursuit vers le nord.

### 2.1 LES DONNÉES

12 coupes et deux puits ont été étudiés en Ardèche. Leurs localisations sont visibles Figure 4-6, p. 120. Au total, 1207 échantillons furent prélevés et étudiés en lames minces. Ces 14 coupes et puits représentent 2605 mètres de série urgonienne. Les logs sont tous visibles en Annexe, paragraphe A1, de la page xxxvii à la page lvii.

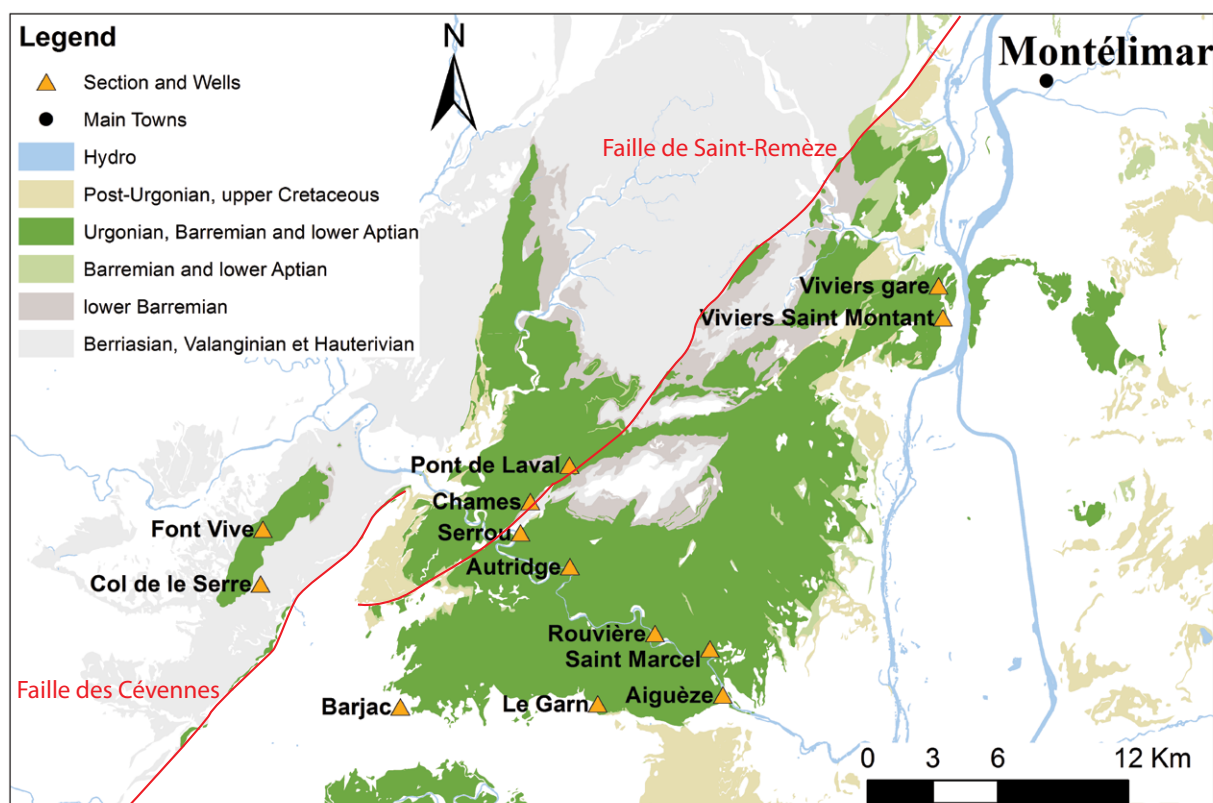


Figure 4-6 : Carte de localisation des coupes et puits dans le secteur de l'Ardèche.

Le puits de Barjac a été foré pour l'alimentation en eau potable de la région et a permis d'obtenir des informations sur l'Urgonien entre les secteurs Gard et Ardèche. Ce puits, a révélé

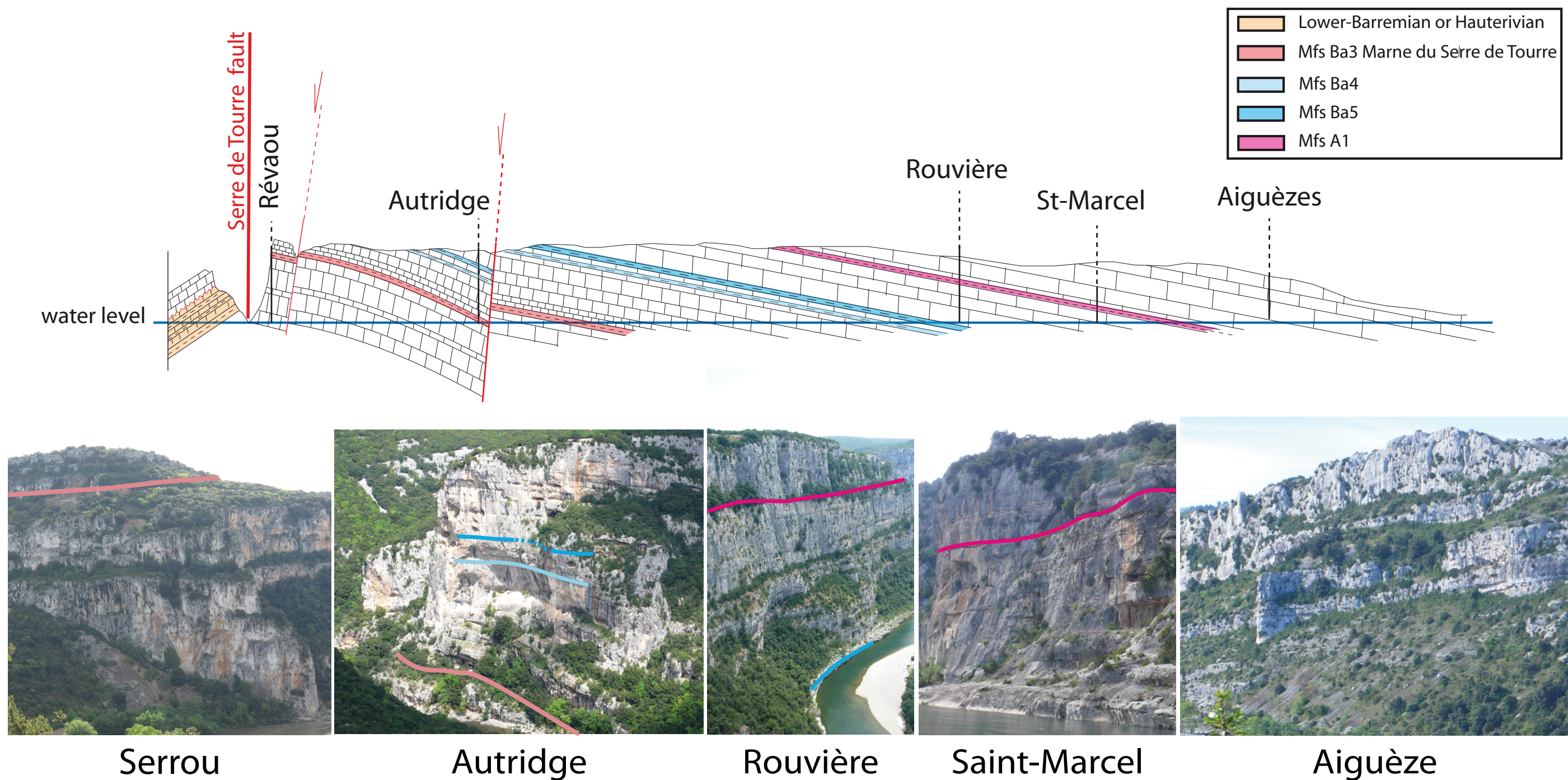
une série urgonienne très réduite composée uniquement de faciès de lagon interne et de plage.

Un peu plus au nord, 440 mètres d'Urgonien ont été creusés et échantillonnés lors du forage du puits du Garn. Par rapport au puits de Barjac, les cortèges sont redevenus plus épais et les faciès observés sont plus diversifiés. En plus des faciès décrits à Barjac, des faciès de lagon externe et des faciès granulaires encore plus ouverts sont présents dans le puits du Garn.

Au fil des années, la rivière « Ardèche » a creusé son lit à travers les calcaires urgoniens créant ainsi des Gorges. Les falaises dessinées par ce phénomène mettent à nu des centaines de mètres d'Urgonien, souvent recouvert par la végétation dans ce secteur. L'observation de ces falaises a montré un pendage des couches vers l'est amenant à rencontrer un Urgonien de plus en plus jeune d'amont en aval. Afin d'échantillonner l'intégralité de la série, cinq coupes ont été levées en rappel le long des falaises bordant les Gorges de l'Ardèche. Il s'agit des coupes de Serrou, Autridge, Rouvière, Saint-Marcel et Aiguèze. L'étude sédimentologique a permis de déterminer la position des surfaces remarquables le long de ces coupes. Elles ont ensuite pu être corrélées les unes aux autres. (cf. Figure 4-7, p. 122)

Ces cinq coupes constituent une coupe composite de 600 mètres qui débute dans le cortège de bas niveau de la séquence Ba3, traverse toute la série urgonienne jusqu'au cortège de haut niveau de la séquence A1 (cf. Figure 4-8, p. 123).





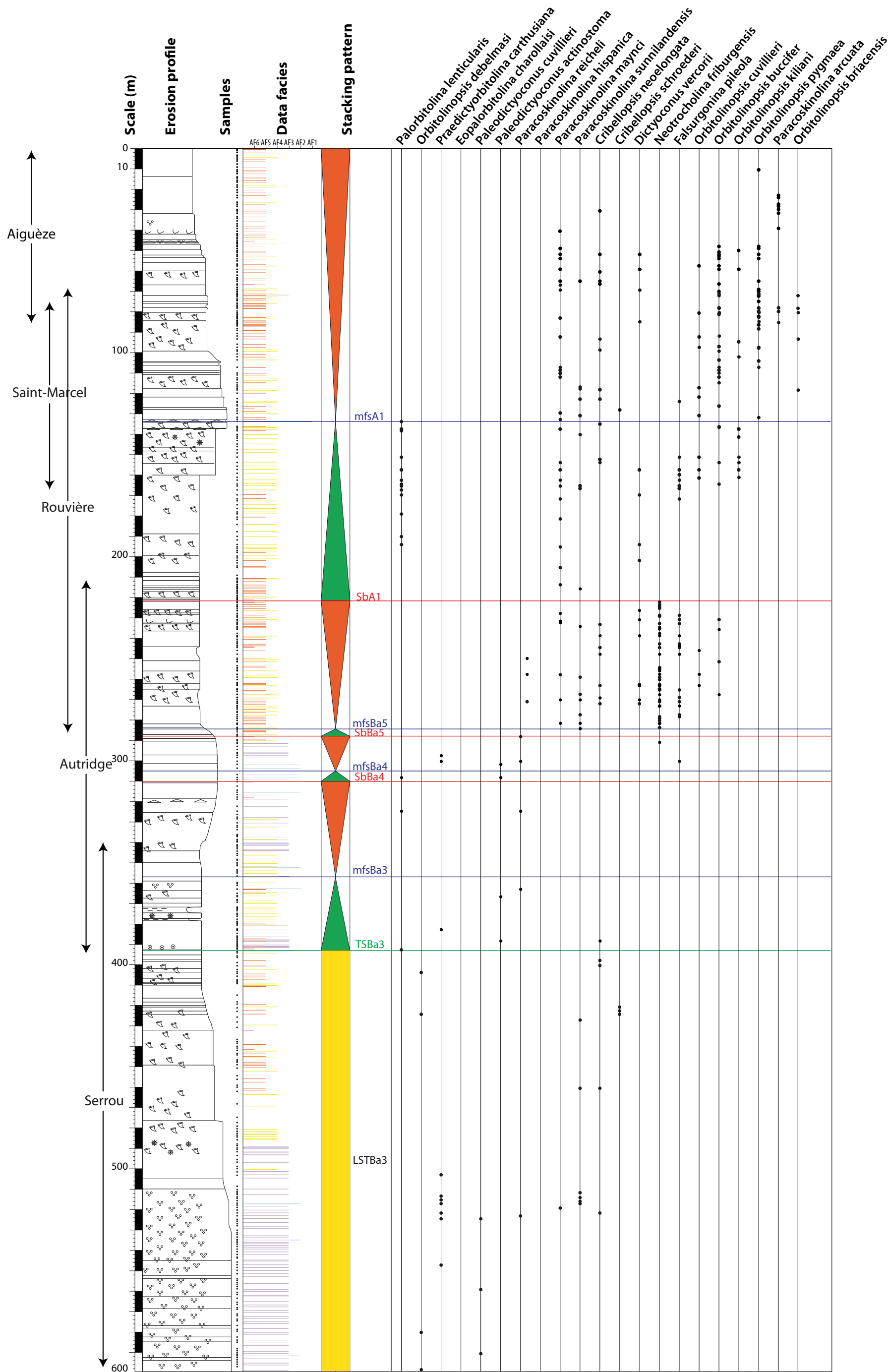


Figure 4-8 : Log de la coupe composite des Gorges de l'Ardèche.



Beaucoup plus au nord, les coupes de Viviers-gare et Viviers-Saint-Montant ont été échantillonnées.

La coupe de Viviers-gare, d'une vingtaine de mètres présente à sa base un calcaire marneux dans lequel Thierry Dumont a trouvé une empreinte d'ammonite, déterminée par Jean Vermeulen comme appartenant à la famille des *Hemihoplitidae*. Ce calcaire marneux est ainsi daté du Barrémien supérieur.

La coupe de Viviers Saint Montant a été levée en discontinue. Une première partie a été échantillonnée le long de la ligne de chemin de fer, et trois autres sections, en rappel, le long des trois petites falaises creusées dans les carrières de Viviers, au dessus de la même ligne de chemin de fer. Une lacune de visibilité d'environ 15 mètres sépare la première section des trois carrières. L'étude des lames minces fabriquées à partir des échantillons prélevés a révélé une micro-faune typique de la séquence de dépôt A1. Dans la première section de la coupe, un niveau plus externe, riche en *Palorbitolina lenticularis* (visibles à l'œil nu) a été défini comme étant la surface d'inondation maximum de la séquence A1. Au dessus de cette surface, 115 mètres de calcaire urgonien constituent le cortège de haut niveau de cette séquence. (Le log de cette coupe est visible en Annexe, paragraphe A1, p. LII).

La faille des Cévennes et la faille de Saint-Remèze séparent le secteur ardéchois en deux (cf. Figure 4-6, p. 120). Le déplacement relatif du secteur ouest par rapport au secteur est n'est pas quantifié. Aucune corrélation entre les coupes situées de part et d'autres de ces failles n'a donc été réalisée.

Néanmoins, la coupe appelée « Chames » visible depuis le sommet de la coupe de Serrou, (près du panorama du Serre de Tourre), en regardant vers l'ouest, permet d'intéressantes observations. Le passage des calcaires à faciès bioclastiques fins à des faciès hémipélagiques du sud vers le nord est visible à la base de la coupe. Ces niveaux sont surmontés par des corps bioclastiques plus grossiers. L'ensemble de ces bancs montrent une organisation en progradation du sud-ouest, vers le nord-est (cf. Figure 4-9, p. 125). De plus, la microfaune contenue dans les trois corps bioclastiques sommitaux rappelle celle observée à la base de la coupe de Serrou, dans le cortège de bas niveau de la séquence Ba3. Les progradations observées à Chames sont donc très probablement datées de la base du Barrémien supérieur. Elles constituent la première évidence d'une organisation de la plateforme urgonienne qui respecte la direction plateforme-bassin.





Figure 4-9 : Photographie du panorama de Chames pris depuis le Serre de Tourre. Les traits noirs représentent les limites des corps carbonatés bioclastiques. Le « zig-zag » orange représente le passage des faciès bioclastiques fins aux faciès hémipélagiques.

En photographie aérienne, ces progradations sont également visibles. Elles se suivent vers le nord-ouest, en direction de la coupe de Pont de Laval. Une faille empêche la continuité des bancs carbonatés entre ces deux coupes. Néanmoins, l'étude de la coupe de Pont de Laval a permis de mettre en évidence à sa base le cortège de bas niveaux de la séquence Ba3. Il est surmonté par les cortèges transgressifs et régressifs de la même séquence. Ces attributions stratigraphiques ont été par la suite confirmées par l'étude du signal de  $\delta^{13}\text{C}$  des 266 mètres sommitaux de cette coupe (cf. chapitre 3, paragraphe 4, p. 87). On retrouve à la base de cette coupe, les mêmes calcaires bioclastiques que ceux observés à Chames.

Beaucoup plus à l'ouest, deux coupes ont été levées afin de caractériser l'Urgonien du massif du Col de la Serre. Ces deux coupes, à l'ouest de la faille des Cévennes, n'ont pas été corrélées aux autres. Ces deux coupes sont constituées de calcaires bioclastiques fin à grossiers, rappelant ceux observés dans le cortège de bas niveaux de la séquence Ba3.

## 2.2 INTERPRÉTATIONS

La coupe de Chames permet d'observer l'apparition des premiers faciès bioclastiques, que l'on retrouve dans la coupe de Pont de Laval, surmontés des premiers calcaires à rudistes. Ces coupes prouvent que la base des faciès urgoniens à rudistes se situe dans la première séquence du Barrémien supérieur. La correspondance des faunes entre les coupes de Chames et de Serrou laisse penser que la limite de séquence Ba3 ne doit pas se trouver très en dessous de la base de la coupe de Serrou.

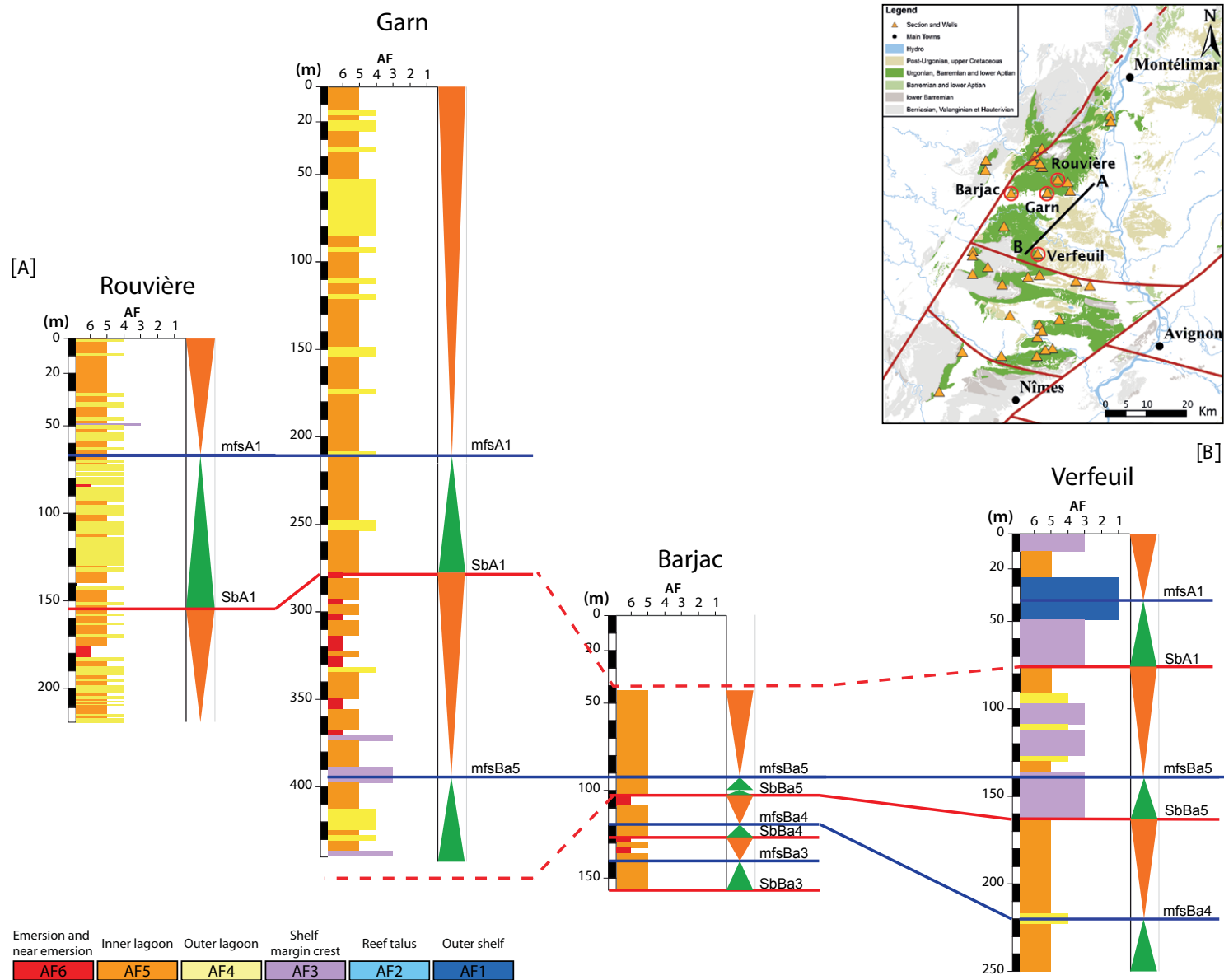
La base marno-calcaire de la coupe de Viviers gare attribuée au Barrémien supérieur oblige à placer le passage des faciès de plateforme au faciès hémipélagique entre les Gorges de l'Ardèche et cette dernière coupe. En revanche, à l'Aptien, cette limite doit être déplacée vers

le nord en raison des calcaires urgoniens déterminés d'âge bédoulien dans la coupe de Viviers Saint-Montant. L'avancement du passage des faciès urgoniens au faciès hémipélagique vers le nord est cohérent avec le caractère progradant de la plateforme urgonienne défini dans d'autres secteurs (Adate *et al.*, 2005).

L'organisation de la série urgonienne des Gorges de l'Ardèche pourrait être le résultat de progradation d'ouest en est, expliquant ainsi la présence de niveaux de plus en plus récents, ainsi qu'un pendage des couches, vers l'est. Or, si tel était le cas, une diminution des épaisseurs des corps carbonatés d'ouest en est ainsi que des terminaisons de bancs en biseau devraient s'observer. Les coupes levées le long des gorges de l'Ardèche ne se recoupent pas suffisamment pour comparer l'épaisseur d'un même cortège dans deux coupes différentes. Mais, une observation rigoureuse des falaises bordant les Gorges de l'Ardèche n'a révélé aucun indice de ce genre.

En revanche, d'après Peyaud *et al.* 2005, la région des Causses (à l'ouest du secteur ardéchois) aurait été recouverte par une épaisseur sédimentaire bien plus importante que celle rémanant aujourd'hui. Il explique la disparition de ces sédiments par des phénomènes d'érosion importants qu'il relie aux mouvements entre l'Ibérie et l'Europe puis, à l'orogénèse alpine. Il apparaît plus probable que ces mêmes phénomènes d'érosion, plus importants d'est en ouest, associés à un basculement vers l'est, soient à l'origine de l'organisation de la série urgonienne des Gorges de l'Ardèche observable aujourd'hui.

Afin de caractériser la géométrie de la série urgonienne ainsi que le contexte dans lequel elle s'est déposée, la coupe de Rouvière (Gorges de l'Ardèche) a été corrélée aux puits du Garn, de Barjac et de Verfeuil situés au nord du secteur Gard. L'augmentation des épaisseurs entre le puits de Barjac et de Verfeuil, ainsi que la présence de faciès plus profonds à Verfeuil pourrait être interprétée comme le résultat de dépôt en éventail déposé dans un troisième bloc basculé. Le système en blocs basculés définis dans le Gard se prolongerait alors vers le nord. Cela impliquerait la présence d'une faille, de même orientation que celle de Sauzet et de Connaux, au nord de Barjac. Le puits du Garn (au nord de Barjac) se trouverait alors en pied de bloc, et une diminution des épaisseurs serait attendue vers le nord. Or, l'évolution des épaisseurs et des environnements de dépôt le long du transect nord-ouest - sud-est illustrée Figure 4-10, p. 127, est tout autre.



Les épaisseurs des cortèges sédimentaires augmentent depuis le puits de Barjac vers la coupe de Rouvière en passant par le puits du Garn. Un approfondissement des environnements de dépôt s'observe également du sud-ouest vers le nord-est entre ces trois localités. Cette évolution est contraire à celle attendue dans un système en blocs basculés. La répartition des épaisseurs et des environnements de dépôt correspond d'avantage à une géométrie classique de bordure de plateforme avec un approfondissement de plus en plus important vers le bassin. Les épaisseurs plus importantes à Verfeuil qu'à Barjac, ainsi que les faciès plus externes qui y sont rencontrés sont interprétés comme le résultat d'une subsidence différentielle entre ces deux sites. Cette subsidence plus importante à Verfeuil serait due au jeu de la faille de Connaux, située un peu plus au sud, qui engendrerait un phénomène de roll-over dans le secteur nord du Gard. Le puits du Garn serait alors localisé au niveau d'un haut-fond expliquant ainsi l'augmentation d'épaisseur de série urgonienne de part et d'autre de ce puits. Cette hypothèse est illustrée Figure 4-11, p. 129.

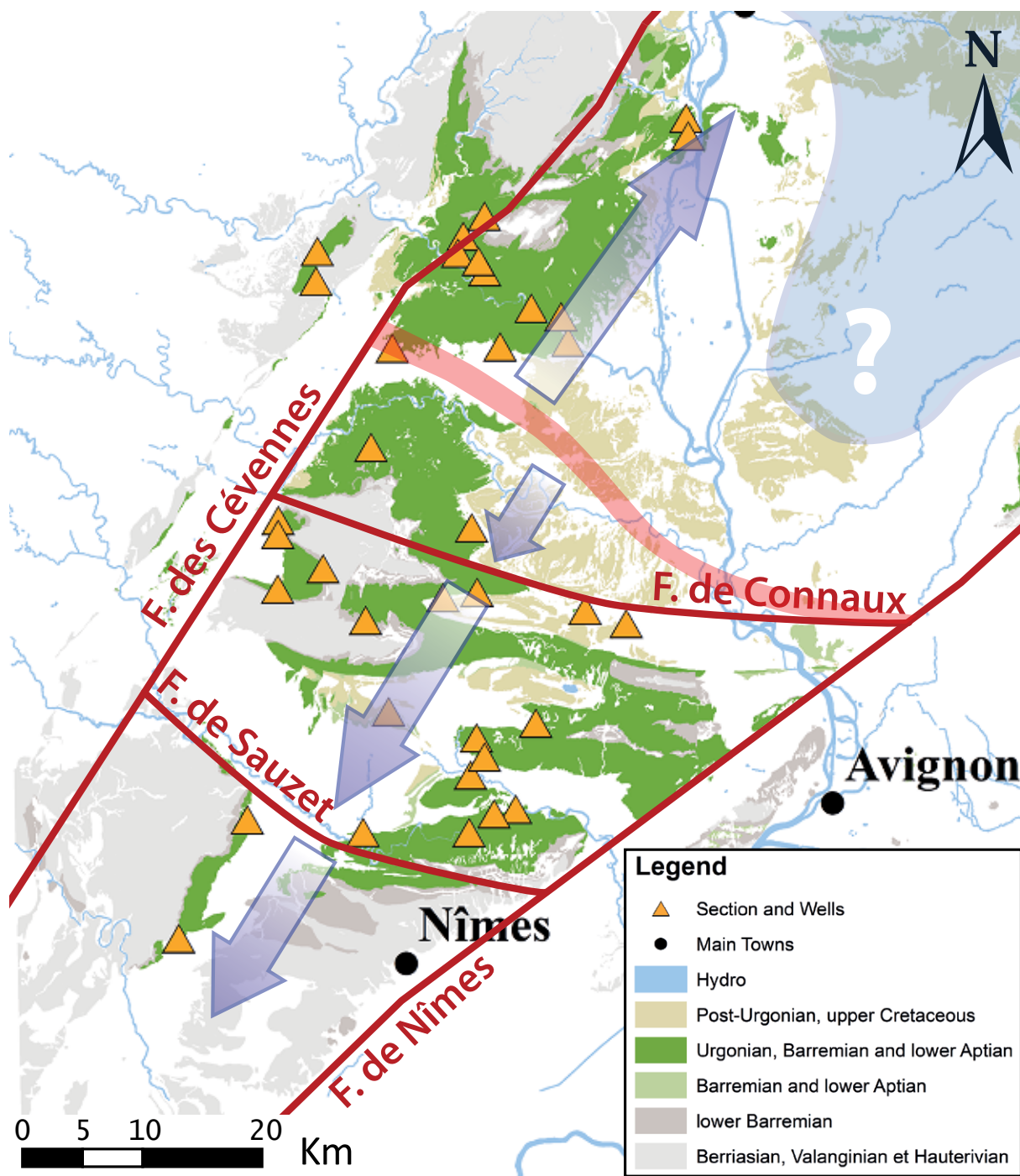


Figure 4-11 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien du Gard et de l'Ardèche. Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés, les flèches bleues, la subsidence induite par le jeu des failles, la zone rouge représente la zone de haut-fond et le bassin Vocontien est représenté en bleu clair. Le point d'interrogation illustre l'incertitude sur sa géométrie dans ce secteur.

### 3 VERCORS

Le Vercors est un secteur particulier car le bassin vocontien, de part sa paléogéographie, se trouve sur sa bordure sud et ouest. L'objectif de l'étude de ce secteur est d'apprécier la géométrie de la série urgonienne qui s'y est déposée et de déterminer les objets structuraux qui ont pu l'influencer.

#### 3.1 LES DONNÉES

L'ensemble des données acquises dans ce secteur proviennent des coupes levées dans le cadre des thèses d'A. Arnaud-Vanneau et d'H. Arnaud. Les échantillons prélevés à l'époque ont été récupérés à l'institut Dolomieu de Grenoble et sont maintenant stockés, avec le reste des échantillons du Sud-Est de la France, à la carothèque du centre scientifique de la société TOTAL, à Pau. Les lames minces réalisées à partir de ces échantillons, ainsi que les logs originaux (à l'échelle 1/100e) m'ont été transmis. Une mission de terrain avec Annie et Hubert Arnaud a également permis une observation directe de ces coupes. Six coupes ont ainsi été intégrées à cette étude. Leurs localisations sont visibles sur la Figure 4-12, p. 131. 714 échantillons et autant de lames minces ont été observés. Au total, les six coupes représentent 1313 mètres de série urgonienne.

Comme pour les coupes du Gard, l'intégralité des lames minces ont été observées afin d'attribuer à chaque échantillon un microfaciès compris dans le modèle de faciès créé spécifiquement pour cette étude (cf. chapitre 3, paragraphe 3.3, p. 78). En revanche, la micro-faune ayant déjà été déterminée par A. Arnaud-Vanneau (experte de cette étude), elle n'a pas été revue. Les déterminations des surfaces remarquables le long de ces coupes ont été ré-étudiées au vue des nouvelles attributions de faciès et sont équivalentes à celles argumentées par Annie et Hubert Arnaud tout au long des années 1990 (Arnaud *et al.*, 1989, 1991, 1995 & 1998).

Les logs de ces six coupes sont visibles en annexes, paragraphe A1, de la page LXXI à la page LXXX.

Additionnellement à ces coupes, de nombreuses données d'épaisseur (plus ou moins précises) de différents cortèges ont été calculées à partir d'interprétations stratigraphiques de plusieurs panoramas, transmis par H. Arnaud lors de communications personnelles, et des courbes de niveau dessinées sur les cartes IGN.



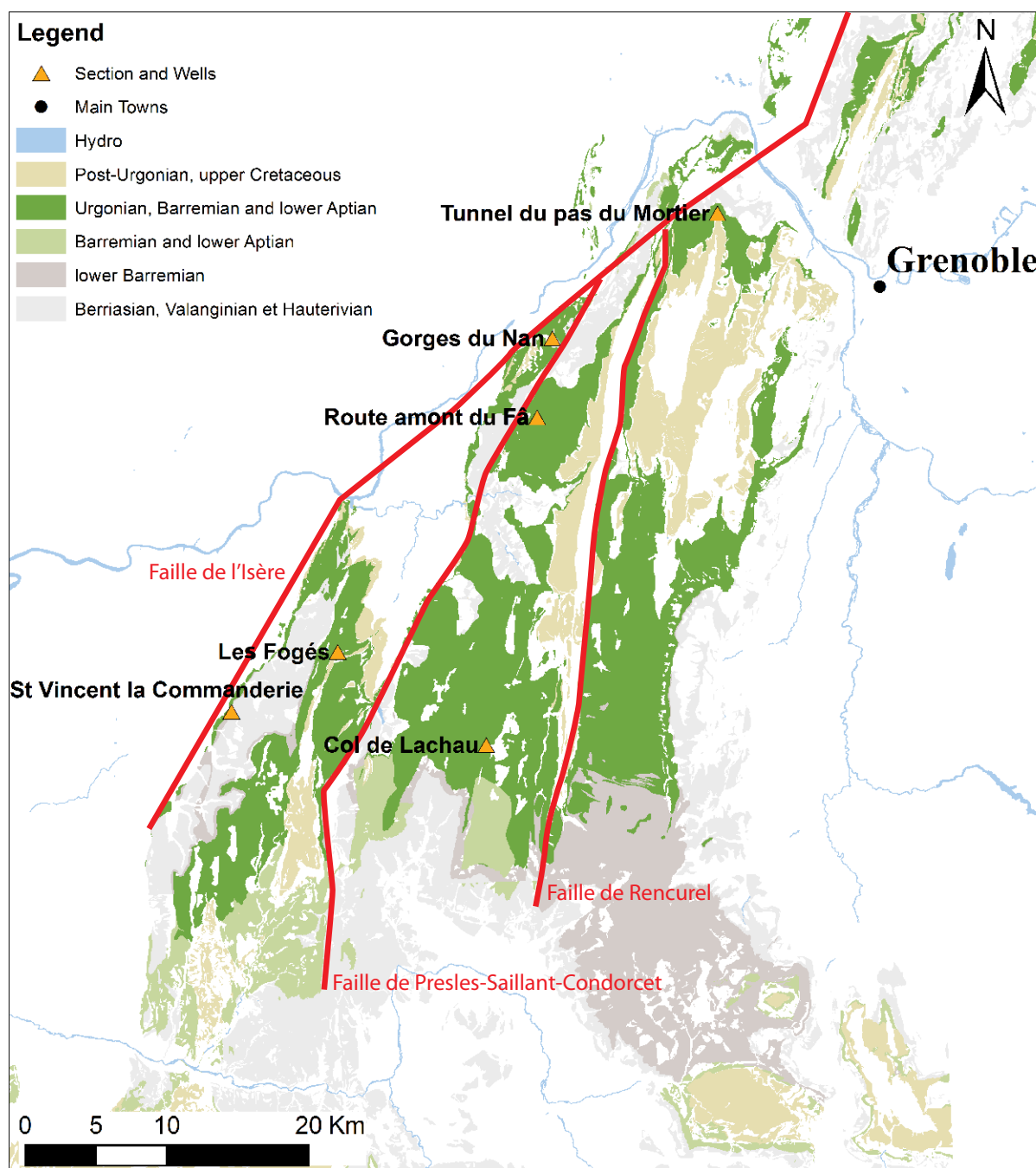


Figure 4-12 : Carte de localisation des données du secteur du Vercors

### 3.2 INTERPRÉTATIONS

La plupart des failles répertoriées dans le secteur du Vercors sont dues à la tectonique post-miocène. Néanmoins, certaines d'entre elles seraient plus anciennes et auraient pu jouer pendant la période de dépôt de l'Urgonien (Arnaud, 1981). Il s'agit des failles sub-méridiennes de l'Isère, de Presles-Saillant-Condorcet et de Rencurel (cf. Figure 4-12, p. 131). Le fait que l'Urgonien se soit déposé dans le Vercors pendant une période tectoniquement active est confir-

mé par l'observation récente d'H. Arnaud d'une paléofaille barrémienne, scellée dans les niveaux urgoniens de la région de Sassenage (cf. Figure 4-13, p. 132).

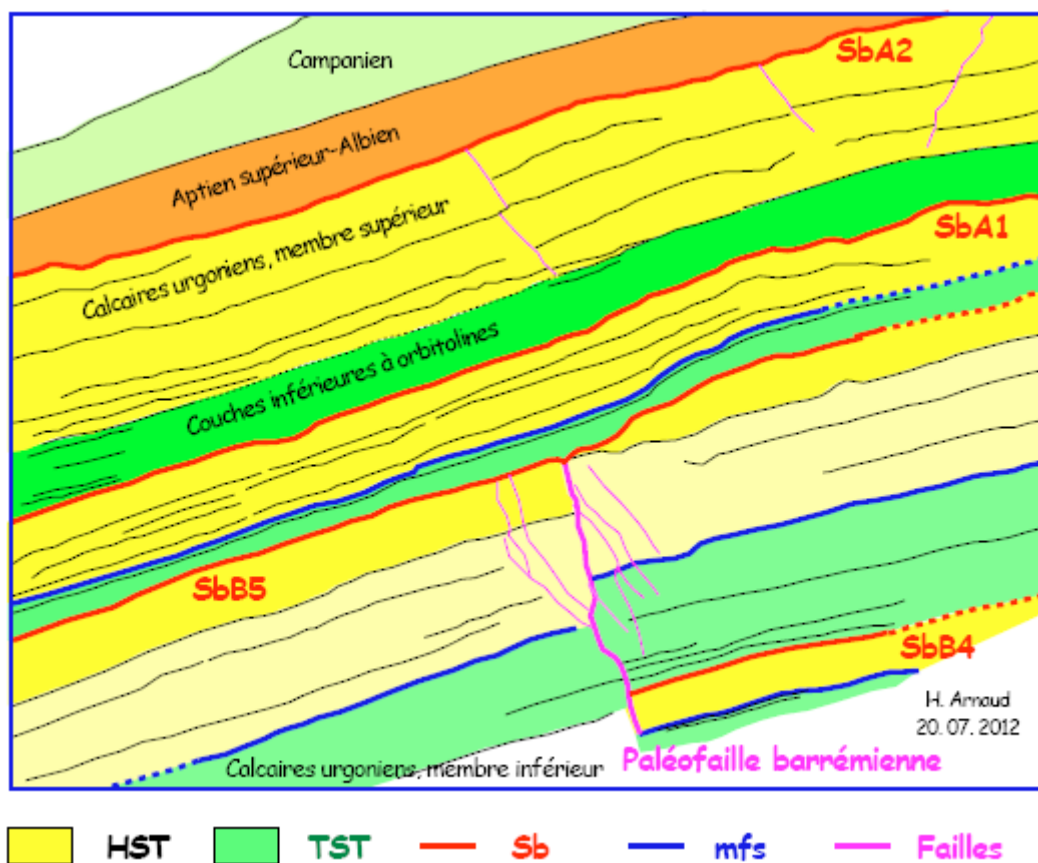
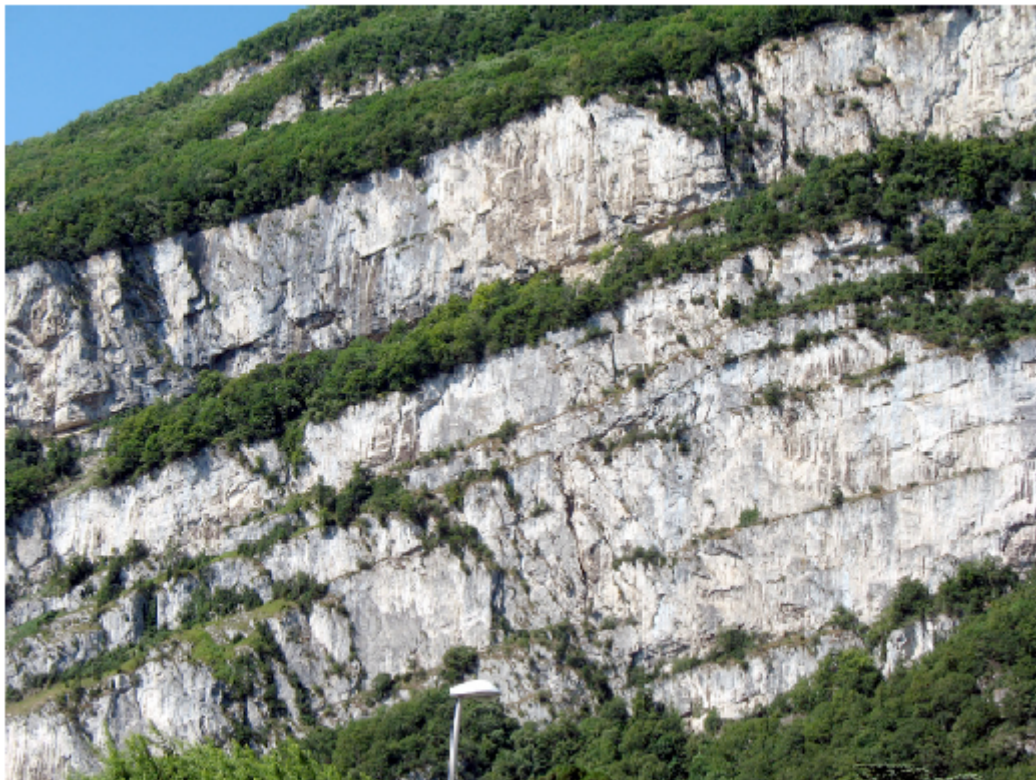


Figure 4-13 : Photo et schéma explicatif d'un affleurement urgonien dans lequel une faille, scellée dans les calcaires urgoniens, est datée du même âge. (d'après H., Arnaud, 2012, communication personnelle).



D'autre part, l'étude approfondie d'un grand nombre de coupes a permis à A. Arnaud-Vanneau de distinguer plusieurs d'entre elles présentant des séries urgoniennes d'épaisseur réduite. Localisées sur une carte, ces coupes semblent s'aligner sur une droite d'orientation nord-est - sud-ouest (cf. Figure 4-14, p. 133).

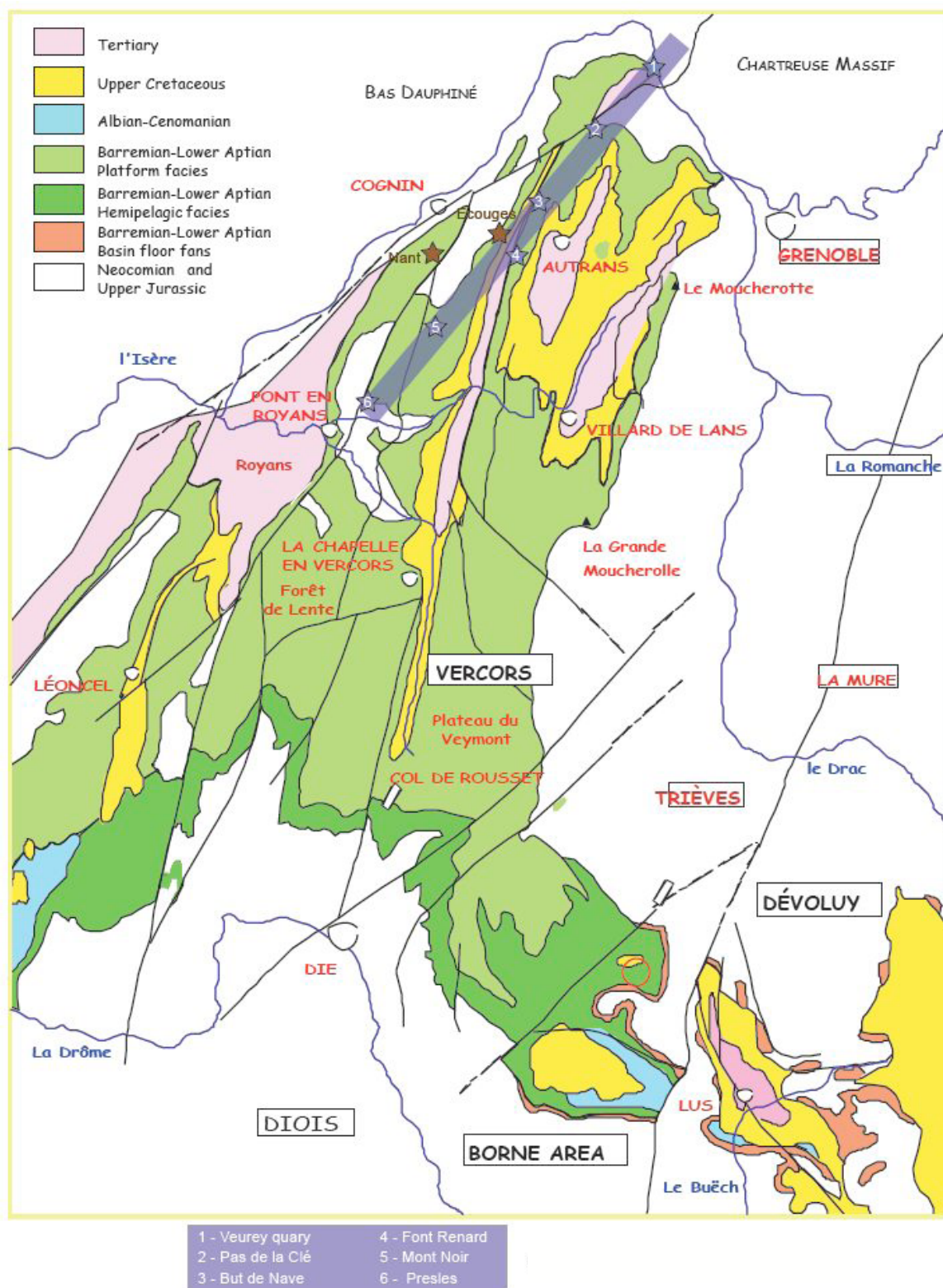


Figure 4-14 : Carte de localisation des séries d'épaisseur réduites (d'après A., Arnaud, 2012, communication personnelle).

A une échelle plus locale, la répartition des séries réduites par rapport aux séries épaisses montre que les hauts-fonds ne sont pas tout à fait alignés, mais légèrement décalés par le jeu des failles de Presles-Saillant-Condorcet et de Rencurel (cf. Figure 4-15, p. 134).

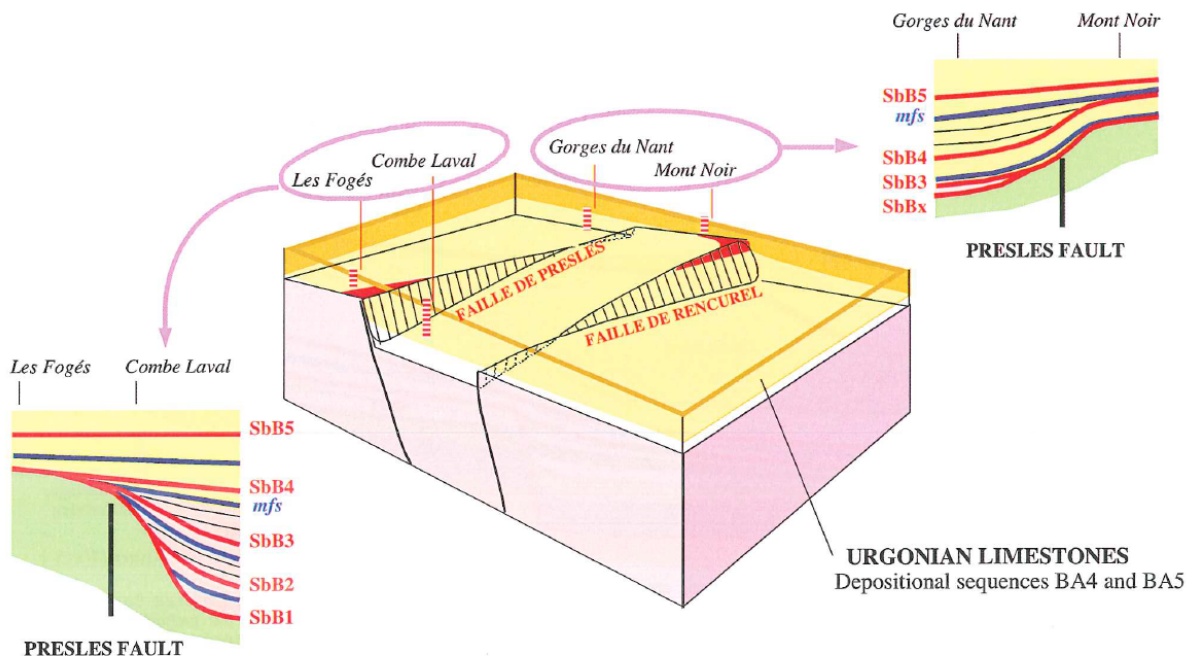


Figure 4-15 : Localisation des hauts-fonds le long des failles de Presles-Saillant-Condorcet et de Rencurel (Arnaud, 2005).

Afin d'apprécier la géométrie de la série urgonienne, la coupe du Fâ (située sur l'alignement des hauts-fonds) a été corrélée avec la coupe du Nan au nord, et la coupe de Lachau au sud (cf. Figure 4-16, p. 135). Les épaisseurs des cortèges de la coupe du Fâ sont, en effet, les moins importantes. Vers le sud, l'augmentation de l'épaisseur de la série urgonienne, s'accompagne de l'apparition de faciès plus externes ce qui est tout à fait cohérent au vue de la position du bassin vocontien : au sud de la coupe de Lachau. D'autre part, les faciès de lagon interne qui composent presque entièrement la coupe du Nan confirment la présence d'un haut-fond plus au sud, responsable de son confinement. En revanche, les épaisseurs plus importantes au Nan indiquent une subsidence différentielle, plus importantes près de la faille de l'Isère qu'au niveau des hauts-fonds.

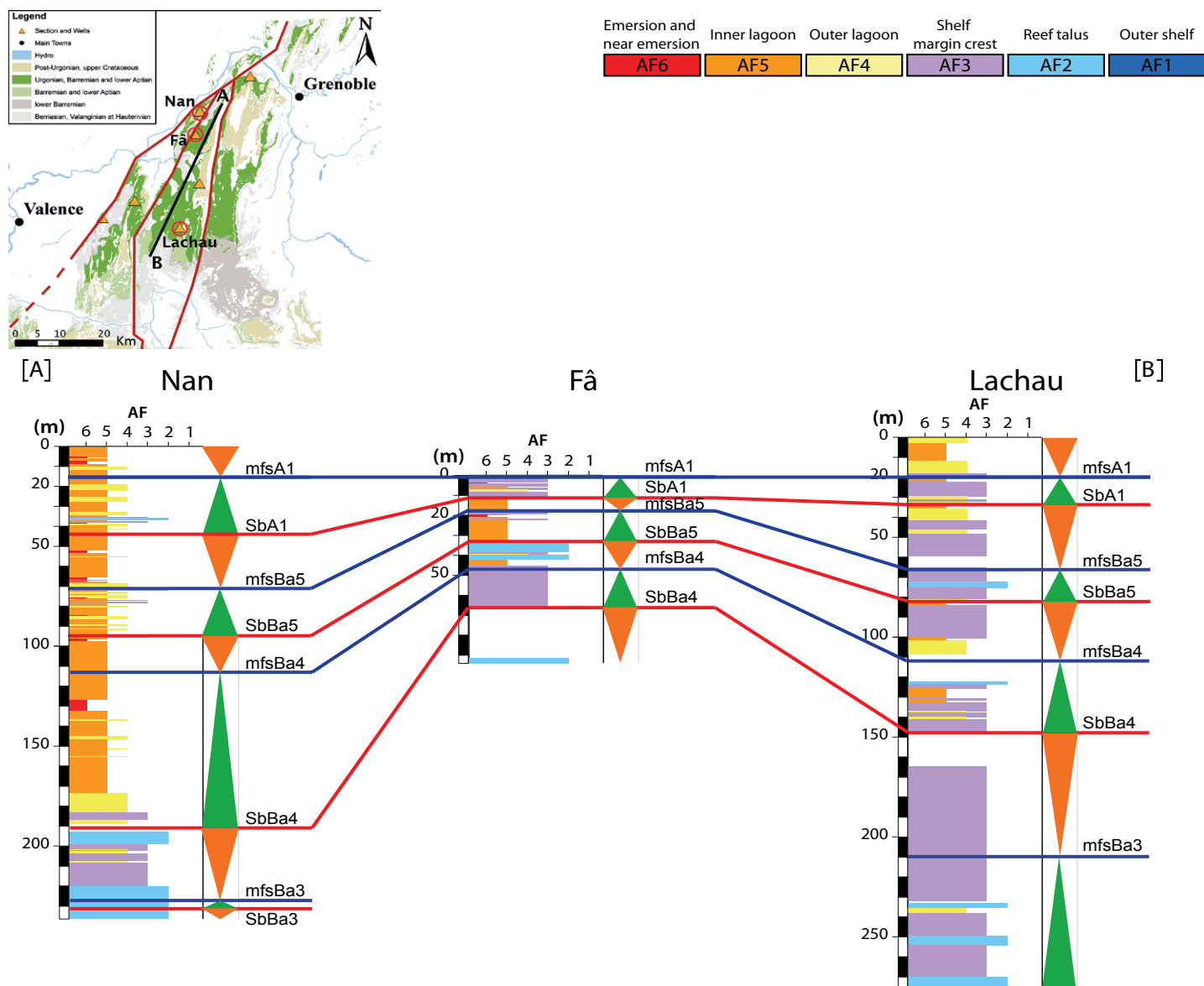


Figure 4-16 : Corrélation de coupes du Vercors le long d'un transect nord-nord-est - sud-sud-ouest.

La géométrie et la répartition des faciès de l'Urgonien du Vercors est donc régie par plusieurs facteurs :

- la paléogéographie du bassin-vocontien;
- le jeu de failles sub-méridiennes syn-sédimentaires qui divisent le Vercors en trois blocs ;
- la présence d'un alignement de hauts-fonds, globalement orienté nord-nord-ouest - sud-sud-est, décalé par les failles de Presles-Saillant-Condorcet et de Rencurel.
- Une subsidence plus importante près de la faille des Cévennes par rapport à la zone des hauts-fonds.
- les variations du niveau global des océans.

L'organisation géométrique de la série urgonienne illustrée Figure 4-17, p. 137 respecte l'ensemble de ces observations.



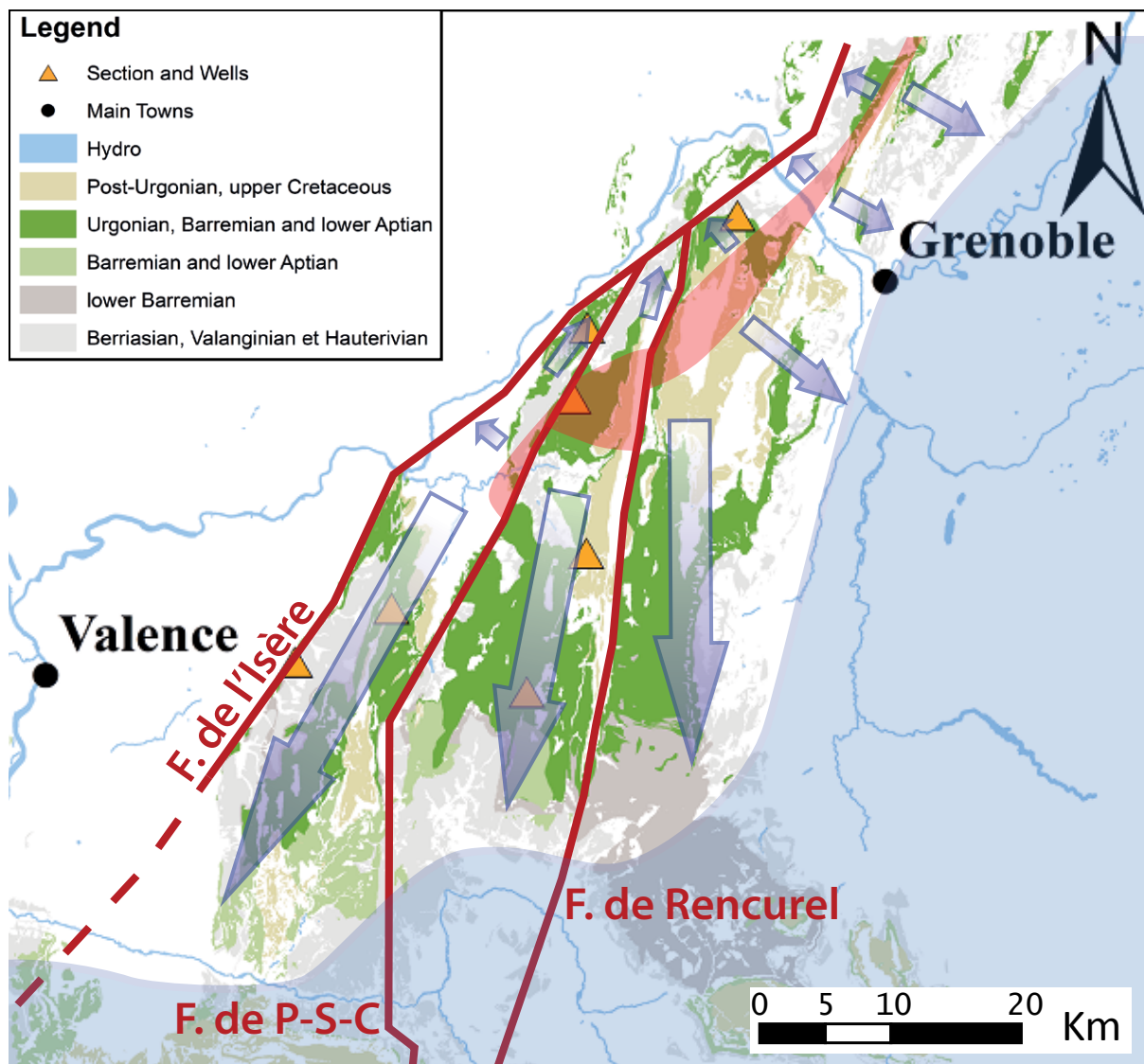


Figure 4-17 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien du secteur du Vercors. Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés, les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles, la zone rouge représente la zone de hauts-fonds et le bassin vocontien est représenté en bleu clair. P-S-C est l'abréviation de Presle-Saillant-Condorcet.

## 4 VAUCLUSE

Le secteur du Vaucluse, limité à l'est et à l'ouest par les failles de Nîmes et de la Durance, est situé sur la bordure sud du bassin vocontien. L'objectif de l'étude de ce secteur est de caractériser la géométrie de la série urgonienne afin de comprendre les mécanismes de son développement.

### 4.1 LES DONNÉES

Trois coupes et deux puits, dont les localisations sont visibles Figure 4-18, p. 138, ont été étudiés dans le secteur du Vaucluse, ce qui représente 1388 mètres de série urgonienne. A partir des échantillons et cuttings, 609 lames minces ont été observées.

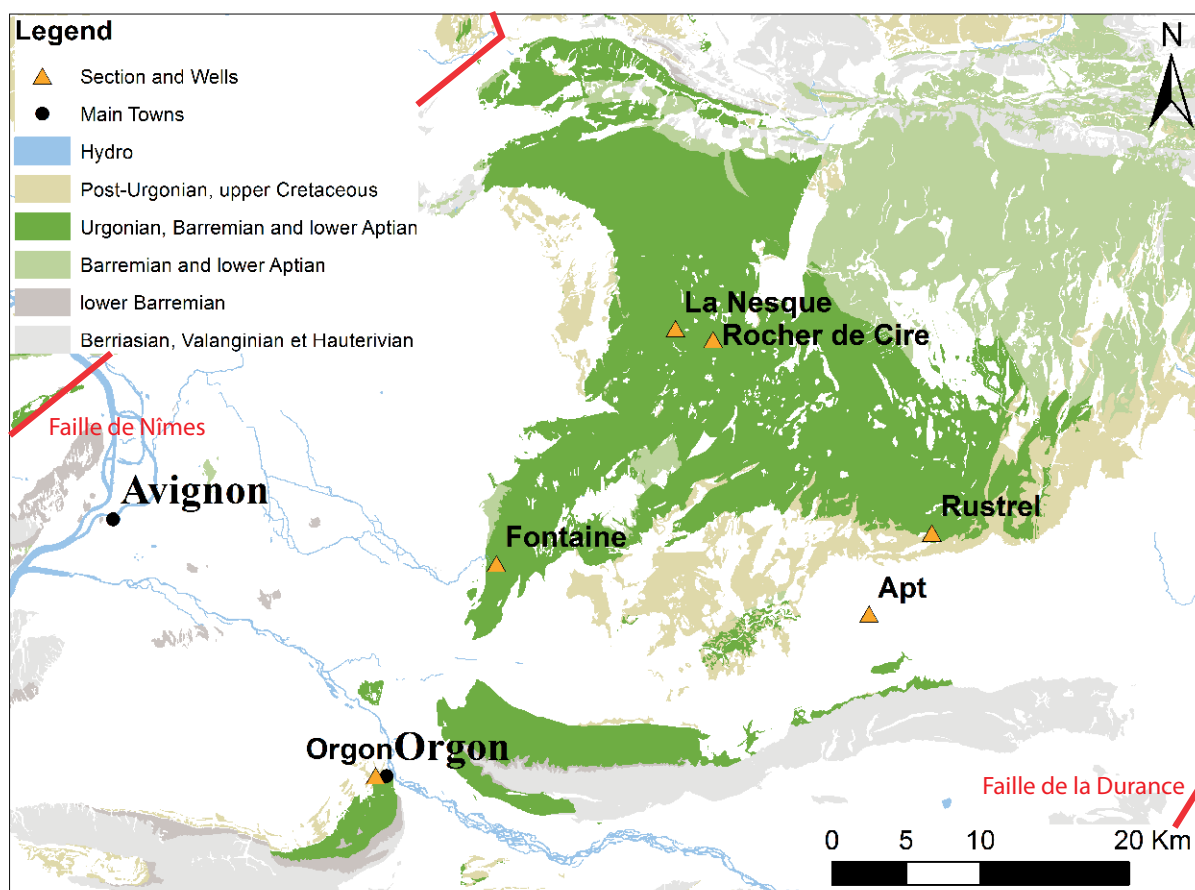


Figure 4-18 : Carte de localisation des coupes et puits du secteur du Vaucluse.

Les trois coupes ont été échantillonnées par P. Léonide lors de son étude sur l'Urgonien des Monts de Vaucluse financé par la société TOTAL (Léonide *et al.*, 2008). Il s'agit de la coupe de Fontaine de Vaucluse, de Rustrel, et de la coupe composite « Cire-Nesque » composée de la coupe du Rocher de Cire à sa base et de la coupe des Gorges de la Nesque au sommet. Les logs, sous format numérique, dessinés par P. Léonide ainsi que les lames minces réalisées à partir des

échantillons prélevés ont été récupérés. Plusieurs missions de terrain ont également été réalisées afin de repérer ces coupes. L'observation des lames minces a permis l'attribution d'un micro-faciès, correspondant au modèle créé spécifiquement pour cette étude, à chaque échantillon localisé sur le log fourni par P. Léonide. La microfaune a également été soigneusement étudiée afin de déterminer la succession des assemblages de faune le long des coupes. A partir de ces observations et déterminations, et en se basant sur les logs dessinés par P. Léonide, de nouveaux logs sur lesquels sont représentés le découpage stratigraphique de chaque coupe ont été réalisés. Ils sont visibles en annexe, paragraphe A1, de la page LXIV à la page LXX.

La coupe de Fontaine de Vaucluse débute sur la limite de séquence Ba4 et se termine dans les premiers niveaux de la séquence A2. Les « drowning » mis en évidence par P. Léonide correspondent aux premiers niveaux montrant un ennoiment de la plateforme, ils sont situés quelques mètres en dessous des surfaces d'inondation maximum déterminées dans cette étude.

A la base de la coupe de Cire-Nesque, le cortège de bas niveau de la séquence Ba3 a été reconnu. Cette attribution stratigraphique est en cohérence avec l'ammonite *Camericeras sp.* qui a été trouvée dans ces niveaux. Cette coupe est majoritairement composée de calcaires bioclastiques, fins à sa base, et de plus en plus grossiers vers son sommet. Au dessus de ces calcaires bioclastiques, les premiers faciès de lagon (à rudistes et coraux) ne se développent franchement que dans les derniers niveaux de cette coupe, dans la séquence Ba5. Cette évolution générale des faciès est en accord avec le caractère progradant de la plateforme urgonienne.

La coupe de Rustrel étudiée dans cette étude correspond à la partie supérieure de la coupe des Antennes étudiée par P. Léonide. Elle débute dans le cortège de la séquence Ba5, par une succession de petites paraséquences de lagon. Au sommet de ces paraséquences se trouve une limite émergitive correspondant à la limite de séquence A1. Au dessus de cette limite, des niveaux très riches en *Palorbitolina lenticularis* se sont déposés. C'est dans ces niveaux qu'a été localisée la surface d'inondation maximum de la séquence A1. Le cortège de haut niveau de la séquence A2 est principalement composé de faciès bioclastique.

En plus de ces trois coupes, 2 puits ont été forés afin d'obtenir des données inédites. Malheureusement, seuls des cristaux de calcite ont pu être observés dans les cuttings provenant du puits d'Apt. L'outil de forage a probablement dû suivre un plan de faille, aucune donnée sur l'Urgonien de ce secteur n'a donc été obtenue.

En revanche, le puits d'Orgon, profond de 284 mètres a permis l'obtention de données sur une grande partie de la série urgonienne. L'étude de la succession des microfaciès et de la micro-faune a permis de positionner plusieurs surfaces remarquables. D'après ces interprétations, le puits d'Orgon débiterait dans le cortège de haut niveau de la séquence Ba3 et atteindrait celui de la séquence A1. La majorité des faciès observés dans les cuttings du puits d'Orgon caractérise des environnements de dépôt de plateforme interne. Le log de ce puits est visible en annexe, paragraphe A1, p. LXIX.

Durant sa thèse, Jean-Pierre Masse étudia la série urgonienne d'Orgon, située sous la Chapelle de Notre-Dame de Beau-Regard. Le tracé de la coupe qu'il étudia est représenté par un trait noir sur la Figure 4-19, p. 140. Au vue de la localisation du puits d'Orgon, représenté par une croix dans un cercle sur la Figure 4-19, p. 140, et du pendage des couches, la tête du puits d'Orgon doit se trouver non loin du sommet de la coupe étudiée par Jean-Pierre Masse.



Figure 4-19 : localisation du puits d'Orgon, symbolisé par une croix dans un cercle noir, et de la coupe étudiée par J.P. Masse, représentée par un trait noir, sur la carte géologique de la région d'Orgon.



La Figure 4-20, p. 141 est une figure tirée de la thèse de Jean-Pierre Masse. Il attribue le sommet de la série au Bédoulien et environ 200 mètres de série au Barrémien inférieur.

L'interprétation stratigraphique du puits d'Orgon proposé ici est donc cohérente à celle proposée par Jean-Pierre Masse (Masse, 1976) le long de la coupe d'Orgon.

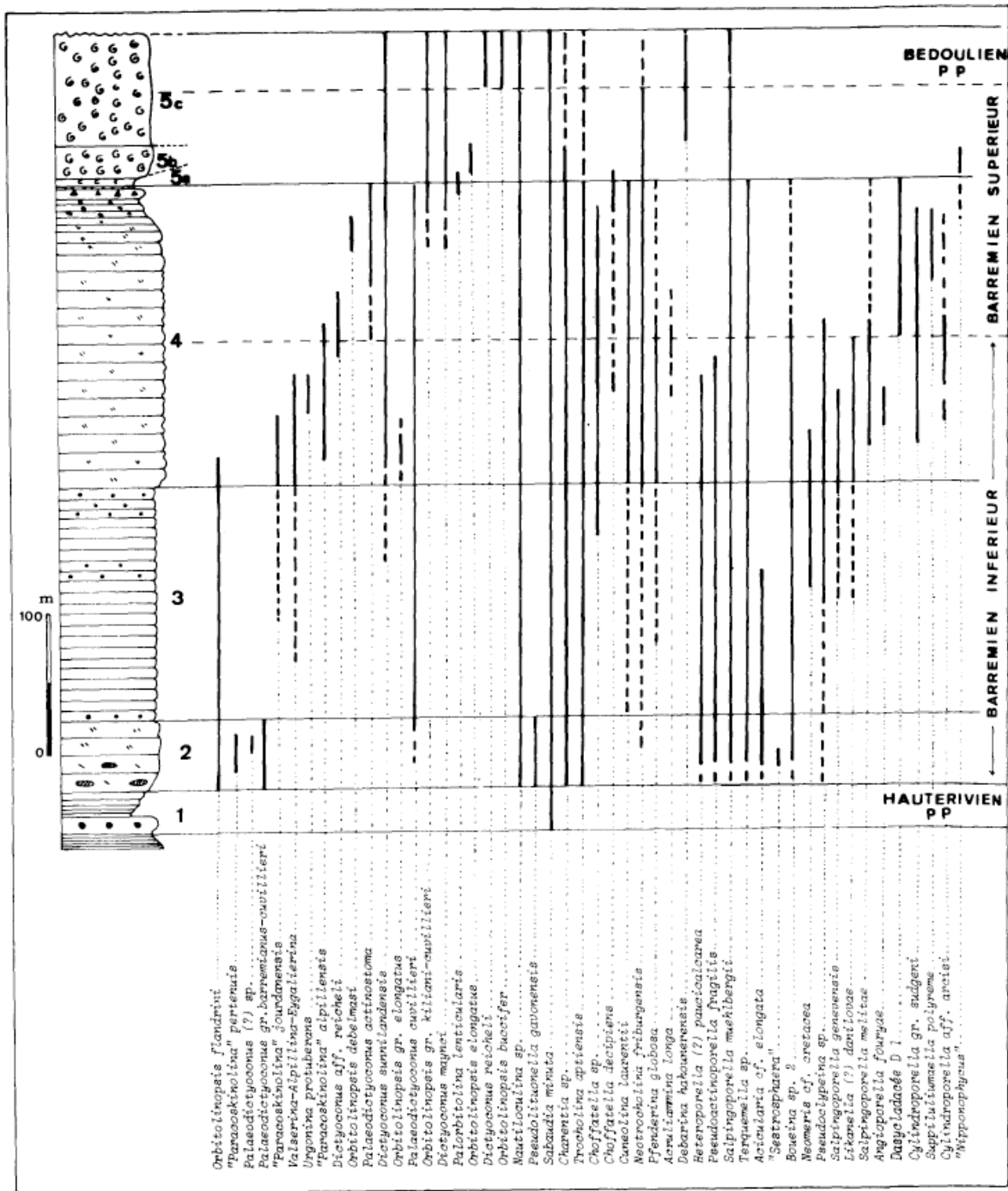


Figure 4-20 : Log stratigraphique de la coupe d'Orgon (Masse, 1976).

## 4.2 INTERPRÉTATIONS

La Figure 4-21, p. 143 illustre la corrélation des coupes et puits du secteur du Vaucluse. La coupe de Cire-Nesque, située la plus au nord, ne recoupe pas les mêmes cortèges que la coupe de Rustrel. Ces deux coupes ne peuvent donc pas être corrélées. En revanche, la puissance de la séquence Ba3 informe sur l'importance de l'espace disponible avant son dépôt. De plus, la présence du cortège de bas niveau de la séquence Ba3 ainsi que l'abondance des faciès granulaires confirment la localisation de cette coupe sur la bordure de la plateforme.

La comparaison des coupes de Rustrel et de Fontaine met en évidence une augmentation des épaisseurs des cortèges vers le sud, c'est-à-dire contraire à la direction plateforme bassin. Au vue de la faible épaisseur de ces cortèges par rapport aux autres coupes, la série urgonienne de Rustrel peut être qualifiée de série réduite. La réduction d'épaisseur de la série urgonienne dans le secteur de Rustrel avait également été mis en évidence P. Léonide lors de son étude sur les Monts de Vaucluse (Léonide *et al.*, 2008).

La présence d'une série réduite proche de la bordure de plateforme et l'épaississement des cortèges sédimentaires vers l'intérieur de la plateforme rappellent ce qui a déjà été observé dans le secteur de l'Ardèche et dans le Vercors.

Malgré la faible quantité des données dans le Vaucluse, un modèle d'organisation de la série urgonienne peut tout de même être proposé grâce à la connaissance acquise dans les autres secteurs du pourtour du bassin vocontien. Une faille normale, équivalente à la faille de Connaux dans le Gard, située au sud de la coupe de Fontaine, pourrait expliquer l'épaississement de l'Urgonien observé dans ce secteur. La série réduite de Rustrel pourrait alors être comparée à celle s'étant déposée à Barjac en Ardèche. Elle serait localisée au niveau d'un haut-fond, conséquence d'un roll-over induit par la faille de Fontaine.



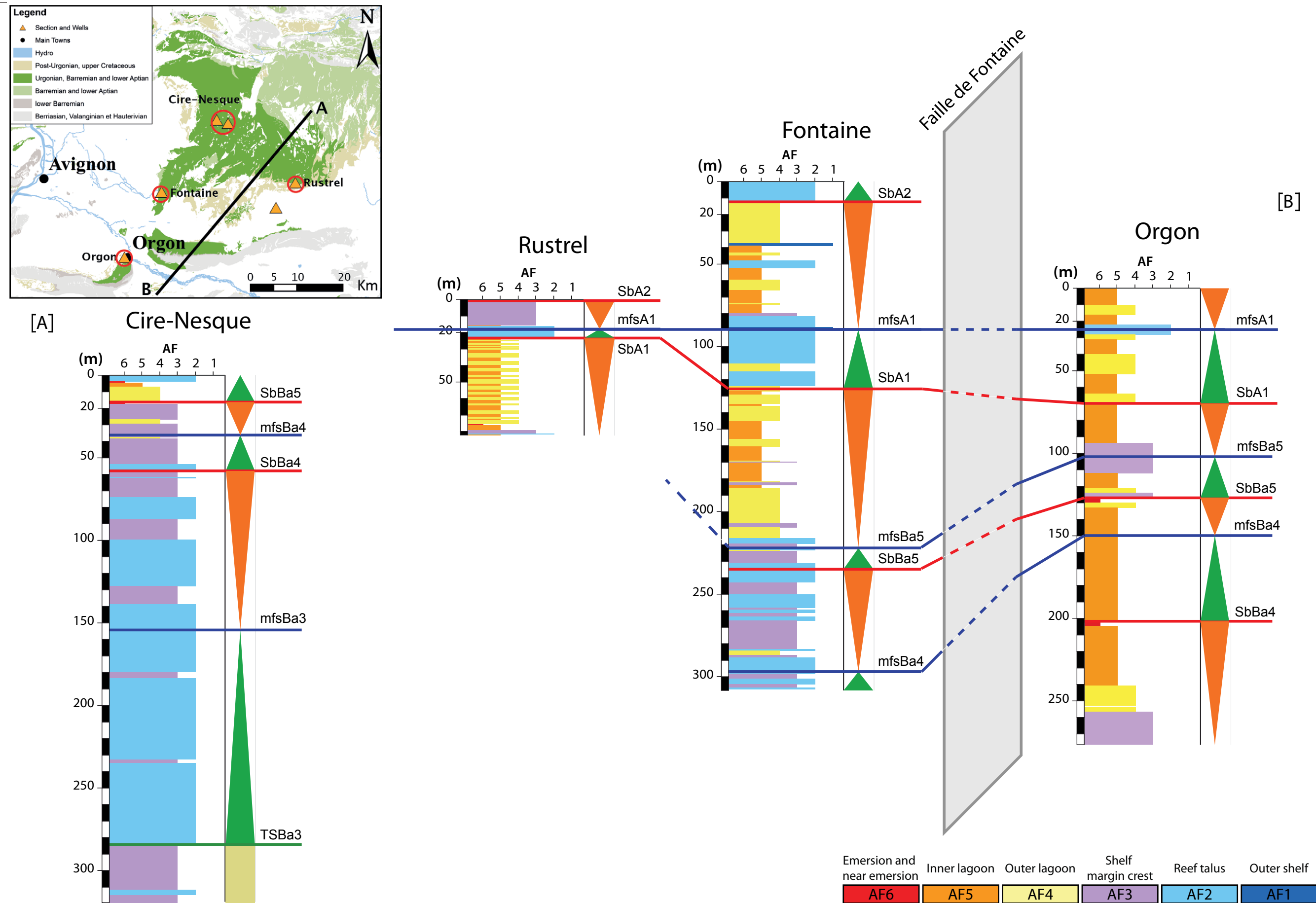


Figure 4-21 : Corrélations des coupes et puits du secteur du Vaucluse.

L'Urgonien d'Orgon, se serait alors déposé dans un bloc basculé, équivalent du bloc central de la région du Gard. Une deuxième faille au sud d'Orgon, limiterait ce bloc basculé et en délimiterait un second au sud. Par comparaison avec le secteur du Gard, où les limites des blocs sont bien contraintes par le grand nombre de données, les deux failles supposées dans la région du Vaucluse devraient délimiter un bloc de largeur équivalente à celui du Gard. De même, leurs directions seraient plus ou moins équivalentes à celle du Gard.

Le fait que les séries d'Orgon et de Fontaine évoluent dans des blocs séparés est confirmé par les différences d'épaisseurs des mêmes cortèges entre ces deux coupes. Si une simple plateforme en rampe existait entre ces deux secteurs, les épaisseurs des cortèges seraient toujours plus importantes à Fontaine qu'à Orgon, or ce n'est pas cas. Au contraire les cortèges transgressifs sont plus importants à Orgon qu'à Fontaine.

D'après les principes de base de la stratigraphie séquentielle (Posamentier *et al.*, 1988), à l'intérieur d'une plateforme carbonatée, les cortèges de haut niveau sont plus puissants que les cortèges transgressifs. Contrairement à ce qui est attendu, les cortèges transgressifs de la série d'Orgon ont des épaisseurs quasi-équivalentes, voir plus importantes que les cortèges de haut niveau. Cette anomalie pourrait être expliquée par l'érosion d'une importante partie des cortèges de haut niveau sous les limites de séquences.

L'ensemble de ces interprétations induisent une répartition des épaissements de la série urgonienne telle qu'illustrée sur la Figure 4-22, p. 145.

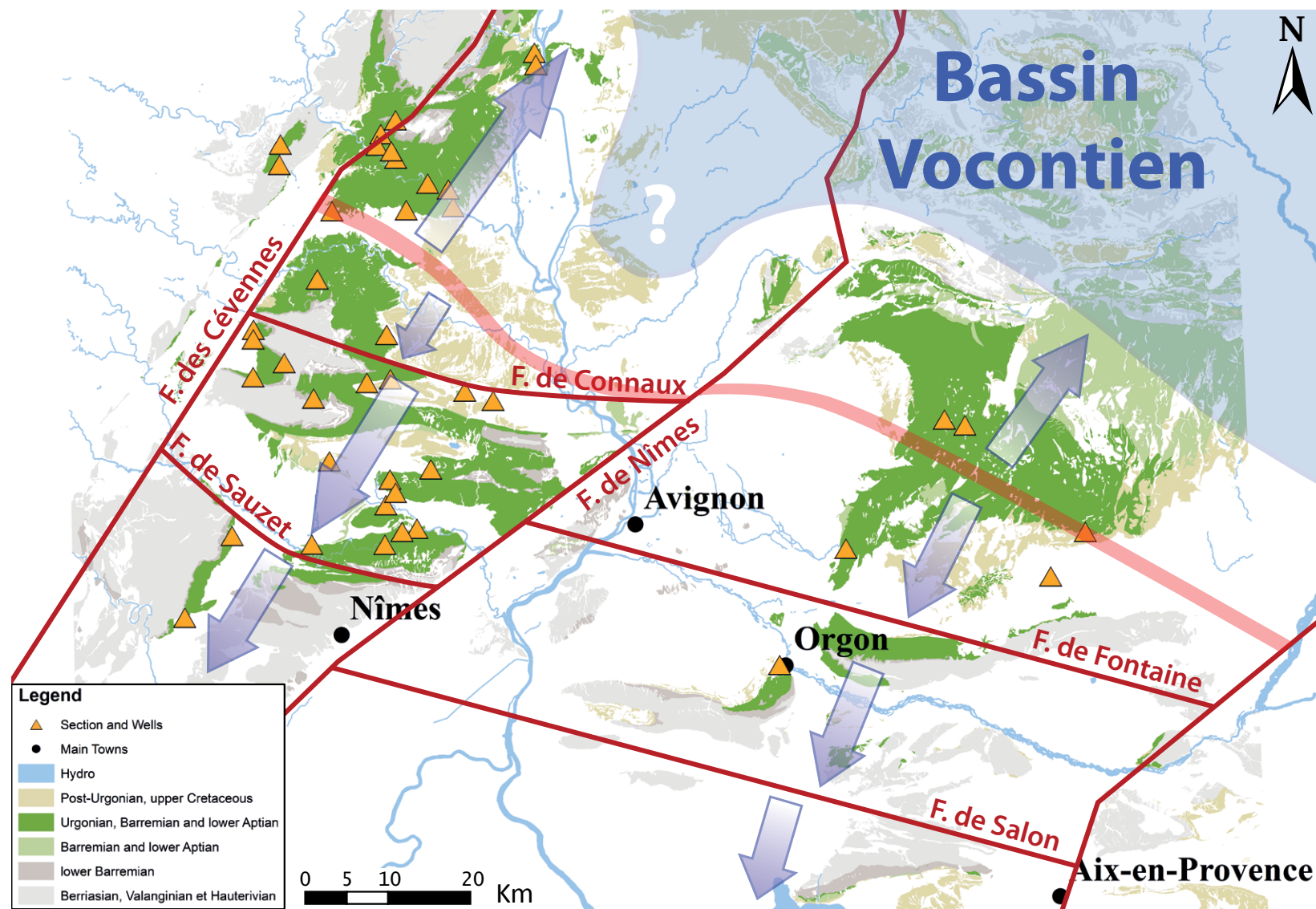


Figure 4-22 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien des secteurs du Gard, de l'Ardèche et du Vaucluse. Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés, les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles et les zones rouges représentent les zones de haut-fond.

## 5 PROVENCE

Ce secteur est situé bien plus au sud que les précédents (cf. Figure 4-1, p. 112). L'objectif principal de son étude est de dater et de caractériser l'Urgonien de Provence pour pouvoir proposer une théorie d'évolution de l'Urgonien de ce secteur cohérente avec les secteurs adjacents.

### 5.1 LES DONNÉES

Dans le but d'obtenir des données sur la série urgonienne sur une épaisseur la plus importante possible, sans risquer de rencontrer des failles ou des fractures, les quatre coupes qui ont été étudiées dans ce secteur ont été échantillonnées en rappel, le long de quatre falaises. 640 échantillons ont ainsi été prélevés à partir desquels autant de lames minces ont été réalisées. Au total, ces quatre coupes représentent 854 mètres de série urgonienne. Ces quatre coupes sont localisées sur la Figure 4-23, p. 146 et les logs sont visibles en annexe, paragraphe A1, de la page LVIII à la page LXIII.

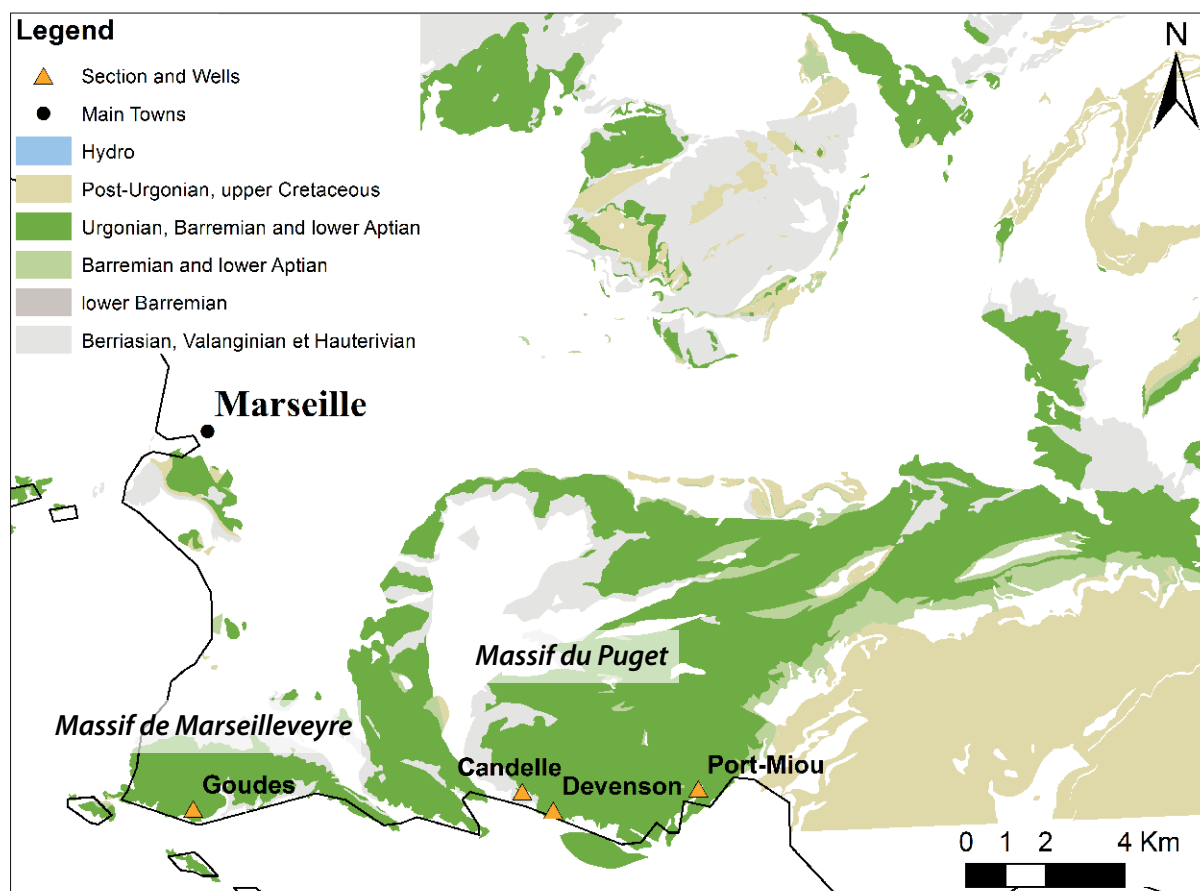


Figure 4-23 : Carte de Localisation des coupes étudiées dans le secteur de la Provence.

La coupe des Goudes est la seule située sur le massif de Marseillevyre. Elle est principalement composée de faciès de plateforme interne à rudistes. L'intégralité de la coupe est

attribuée au Barrémien supérieur. Elle recoupe le cortège de haut niveau de la séquence Ba3, le cortège transgressif de la séquence Ba4 ainsi que la base du cortège régressif de cette même séquence. La limite de séquence Ba4 a été placée au sommet d'un banc à faciès très interne, riche en *Istriloculines*, dans lequel de nombreux keystones vugs ont été observés. La surface d'inondation maximum de cette séquence correspond au niveau dans lequel les faciès les plus ouverts ont été observés : des faciès bioclastiques.

Les trois autres coupes sont situées sur le même massif du Puget. L'observation de ce massif depuis la mer permet d'observer un pendage général des bancs vers l'est. De telle sorte que la base de la série urgonienne est visible à la base de la coupe de la Candelle, et son sommet non loin de la coupe de Port-Miou (cf. Figure 4-14, p. 133)

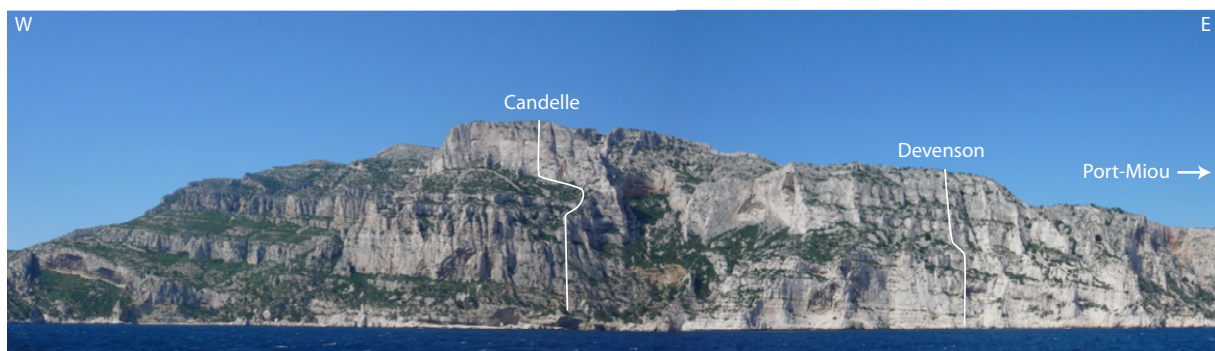


Figure 4-24 : Photographie du Massif du Puget depuis la mer sur laquelle on peut observer le pendage des couches vers l'est.

La coupe de la Candelle débute dans des calcaires marneux à faciès externe surmontés par les premiers faciès urgoniens à rudistes. Grâce à la microfaune et aux données géochimiques (cf. chapitre 3, paragraphe 4, p. 90), ces niveaux ont été datés de l'Hauterivien. L'attribution de la base de cette coupe est en accord avec les travaux précédents (cf. chapitre 2, paragraphe 3, p. 51). En revanche, la microfaune contenue dans les échantillons prélevés au sommet de la coupe est typique du Barrémien supérieur, ce qui est en contradiction avec l'âge Barrémien inférieur déduit des études précédentes. La limite Hauterivien-Barrémien reste incertaine et est probablement située dans la zone fortement dolomitisée, dans laquelle l'attribution de faciès et la reconnaissance de faune est difficile, impossible pour certains échantillons. Cette zone, épaisse d'environ 70 mètres, peut également renfermer tout ou partie du Barrémien inférieur.

La limite de séquence Ba3 a été définie au sommet de la zone dolomitique, au dessus d'un niveau à faciès de plage dans lequel de la dolomie précoce a été observée et au dessous des premiers niveaux dans lesquels des espèces du Barrémien supérieur ont été déterminés. La surface



d'inondation maximum de cette séquence a été localisée dans le niveau présentant les faciès les plus externes : faciès à bryozoaires et échinodermes. Le cortège de haut niveau de la séquence Ba3 est une succession de paraséquences de lagon interne. La limite de la séquence Ba4 est située au sommet de cette succession, au dessus d'un banc dans lequel des ciments asymétriques et des keystones vugs, figures caractéristiques d'environnements proches de l'émersion, ont été observés en lames minces. Les bancs sus-jacents renferment une faune typique de la séquence Ba4. La surface d'inondation maximum de cette séquence a été placée dans un banc riche en échinodermes et petits foraminifères circalittoraux.

La coupe de Devenson, recoupe une bonne partie de la coupe de la Candelle et présente les mêmes caractéristiques. La limite de la séquence Ba3 est également placée au sommet de bancs fortement dolomitisés. La surface d'inondation maximum est probablement localisée dans les niveaux qui n'ont pas pu être échantillonnés, faute d'accessibilité. Elle serait située environ 40 mètres au dessus de la limite de séquence, épaisseur équivalente à celle du cortège transgressif de la séquence Ba3 à la Candelle. Le cortège de haut niveau est également composé de petites paraséquences de lagon interne au dessus desquelles la limite de séquence Ba4 a été déterminée. La surface d'inondation maximum correspond au niveau dans lequel le faciès le plus ouvert a été observé : un grainstone grossier à débris de coraux et de rudistes. Au dessus de cette limite, près de 50 mètres de sédiments cortège de haut niveau à faciès principalement de lagon interne se sont déposés.

La coupe la plus orientale de ce massif est la coupe de Port-Miou qui a été échantillonnée dans l'ancienne carrière située dans la calanque du même nom. Elle recoupe 53 mètres de calcaire urgonien à rudistes. Peu d'espèces d'*Orbitolinidés* ont pu être déterminées, mais la reconnaissance de nombreux spécimens bien développés du genre *Paracoskinolina*, la présence d'*Orbitolinopsis* ainsi que l'abondance des *Néotrocholina* ont permis d'attribuer cette coupe au cortège de haut niveau de la séquence Ba5.

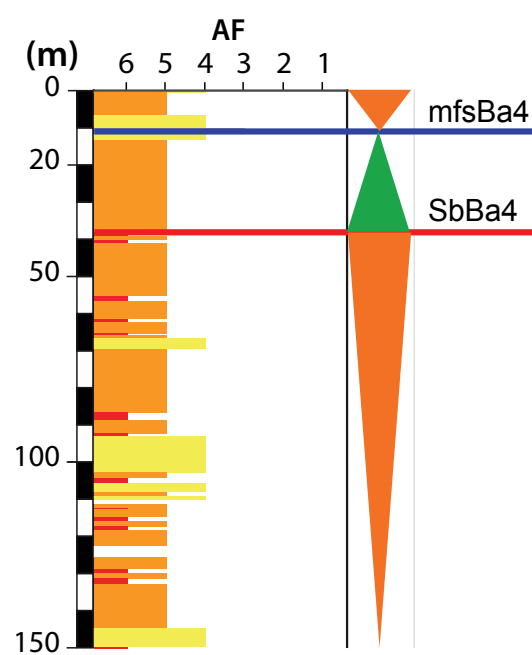
## 5.2 INTERPRÉTATIONS

Les corrélations des quatre coupes du secteur de la Provence sont visibles Figure 4-25, p. 149. Malgré le fait que le rocher des Goudes n'appartienne pas au même massif que les trois autres coupes, la série urgonienne qui s'y est déposée n'est pas différente de celle observée sur le massif du Puget. La coupe de Port-Miou, bien plus haute stratigraphiquement que les autres, ne permet pas de corrélation.

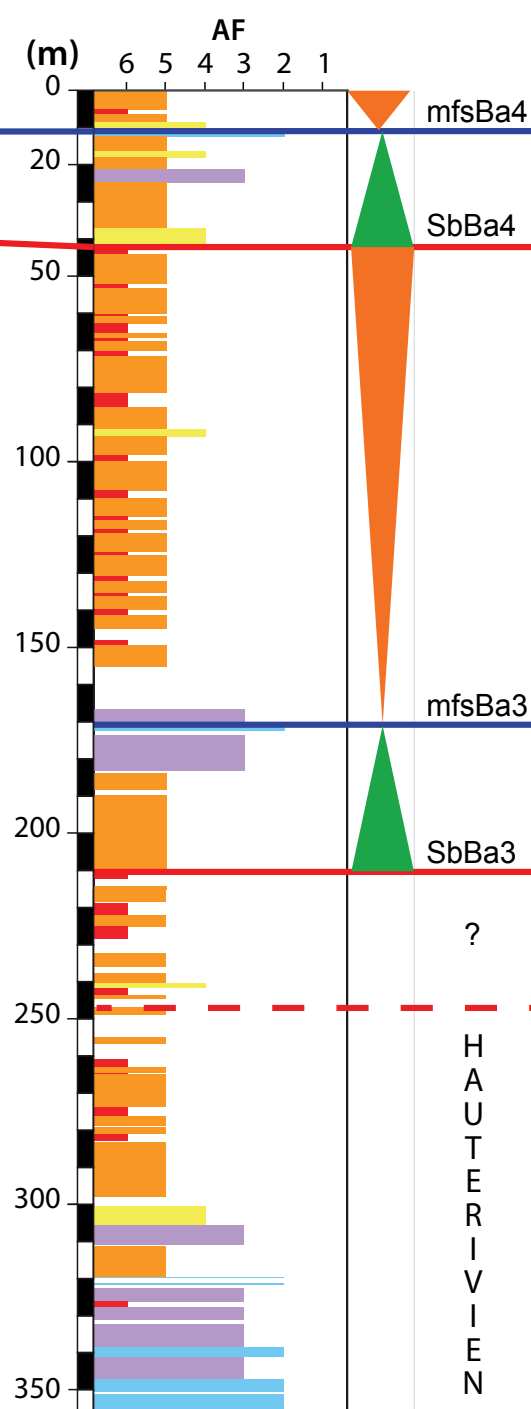


[A]

Goudes



Candelle



Devenson

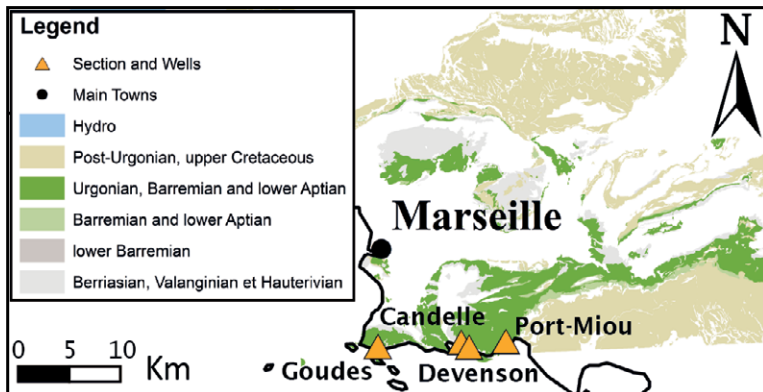
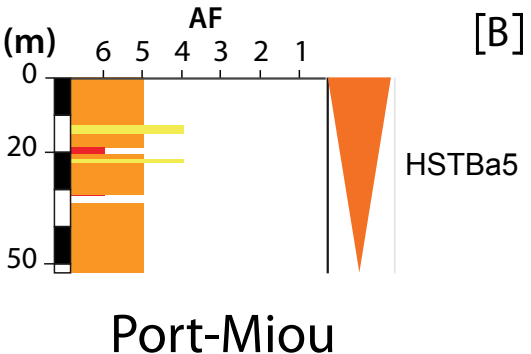
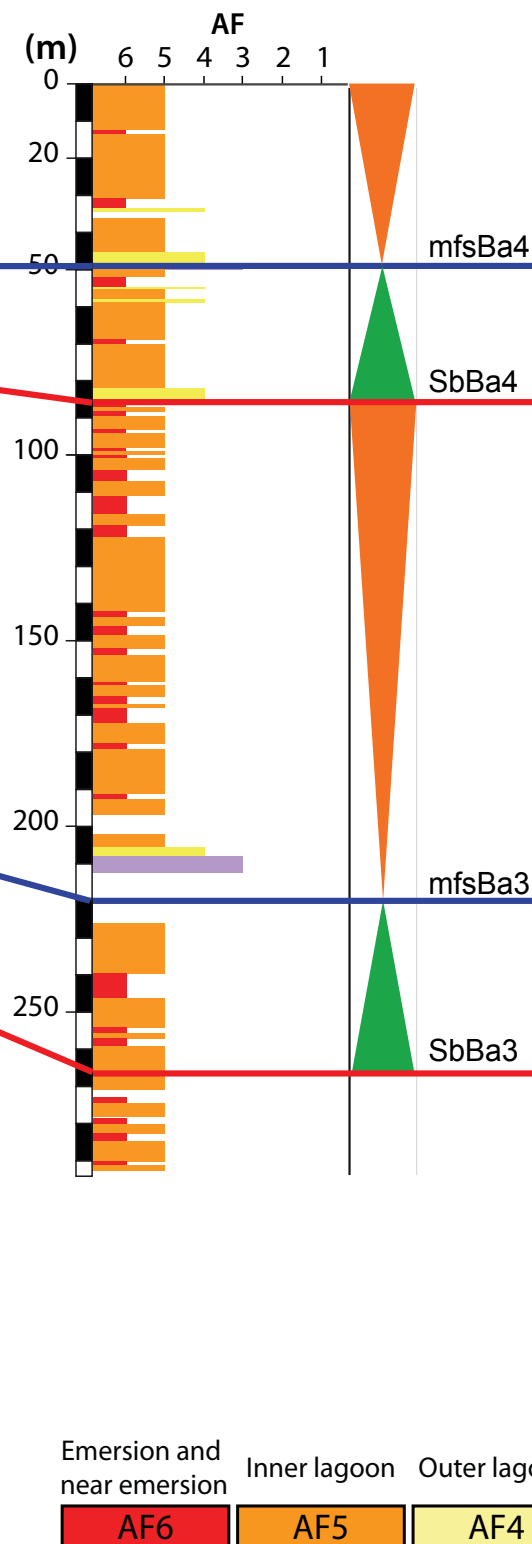


Figure 4-25 : Corrélation des quatre coupes du secteur de la Provence.

Dans l'intervalle de temps qui intéresse cette étude (Barrémien supérieur-Bédoulien), deux remarques peuvent être faites. (1) Dans le Barrémien supérieur, les faciès et les épaisseurs de cortège des coupes de Goudes, Candelle et Devenson sont quasiment identiques. Seul un léger épaissement, sans variation de faciès, peut s'observer d'ouest en est. Aucune coupe n'a été échantillonnée au nord des calanques de Marseille, l'évolution des épaisseurs et des faciès le long d'un transect nord-sud n'a donc pas pu être étudiée. (2) Aucun calcaire à faciès urgonien daté de l'Aptien n'a été repéré dans ce secteur. En revanche, à l'est de la calanque de Port-Miou, notamment au lieu dit la Bédoule, une coupe étudiée par de nombreux géologues révèle la présence de sédiments aptiens à faciès marno-calcaire (cf. chapitre 2, paragraphe 3, p. 51). Les calcaires urgoniens s'interrompent donc au Barrémien terminal pour laisser place à des calcaires argileux s'étant déposés dans des environnements plus profonds.

A la fin du Barrémien supérieur, une subsidence de plus en plus importante a engendré la création d'un bassin, nommé par les auteurs précédents comme le bassin de la bédoule (Masse, 1976) ou bassin Sud-Provençal (Léonide *et al.*, 2008), (cf. Figure 4-26, p. 150). La géométrie de la plateforme urgonienne du secteur de la Provence au Barrémien supérieur est donc bien différente de celle de l'Aptien.

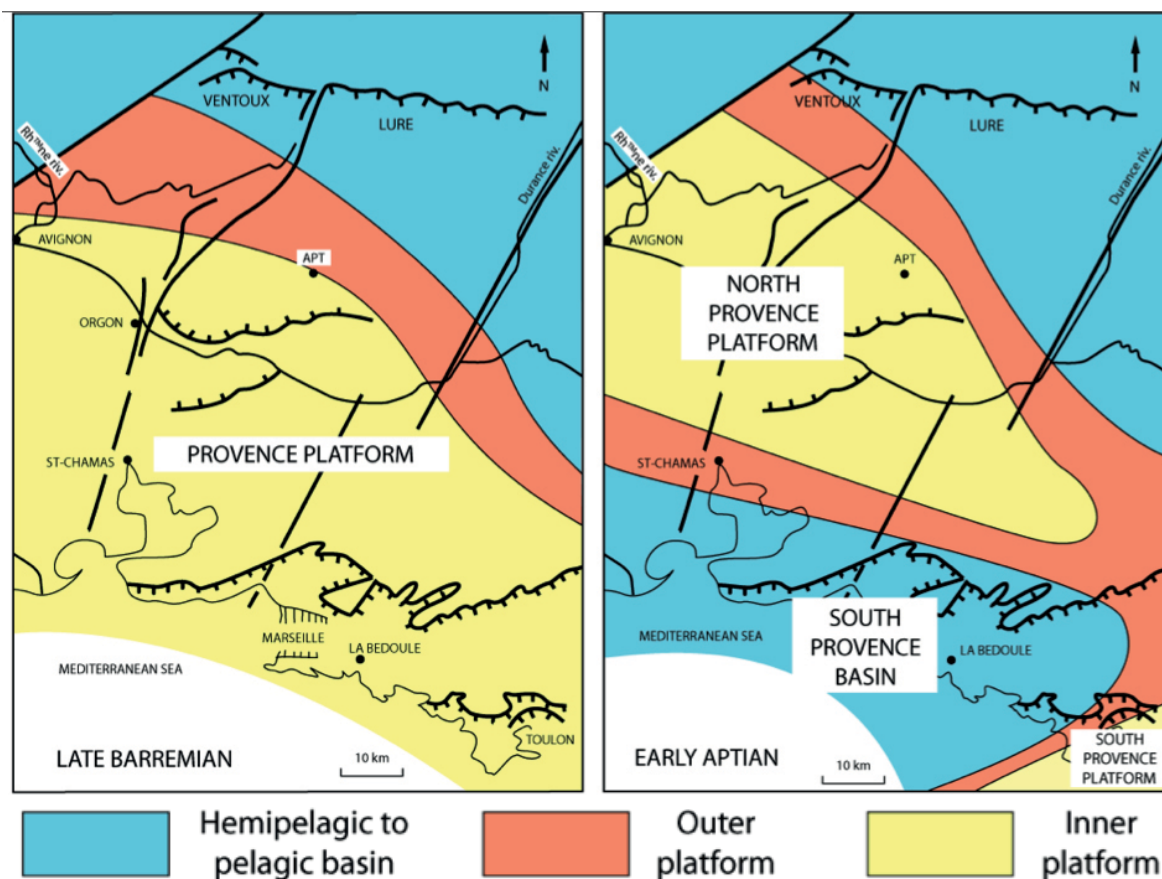


Figure 4-26 : Carte paléogéographique des secteurs Vaucluse et Provence d'après Masse, 1976.

L'étude des secteurs du Gard, de l'Ardèche et du Vercors a prouvé que la géométrie de l'Urgonien est principalement influencée par la subsidence tectonique induite par le jeu de failles synsédimentaires. Les données du secteur du Vaucluse sont également cohérentes avec une tectonique active pendant le dépôt de l'Urgonien. N'ayant pas de données autres que celles énoncées plus haut, l'extension du modèle en blocs basculés vers le secteur de la Provence est la théorie présentant le plus de cohérence à une échelle régionale. Ces blocs seraient limités à l'ouest par la faille de la Durance et à l'est, par une faille plus ou moins parallèle à celle de la Durance. Des failles est-ouest, d'orientation équivalente à celle proposée dans le Vaucluse délimiteraient ces blocs (faille de Gardanne et faille de Rians). Dans chacun d'eux, la subsidence serait plus importante en pied de bloc ce qui induirait des augmentations d'épaisseurs et la présence de faciès plus externes vers le sud-ouest, ce qui est cohérent avec la remarque de J. P. Masse sur les épaisseurs d'Urgonien plus faibles à la Sainte Baume que dans les calanques de Marseille (Masse, 1976). A partir du Barrémien terminal, la subsidence des blocs situés au sud des Monts de Vaucluse et de la Provence s'intensifierait pour aboutir, à l'Aptien inférieur, à l'ouverture du bassin Sud-Provençal. La répartition des épaisseurs en accord avec cette théorie est illustrée Figure 4-27, p. 152 pour la période du Barrémien supérieur, et Figure 4-28, p. 153 pour l'Aptien inférieur.

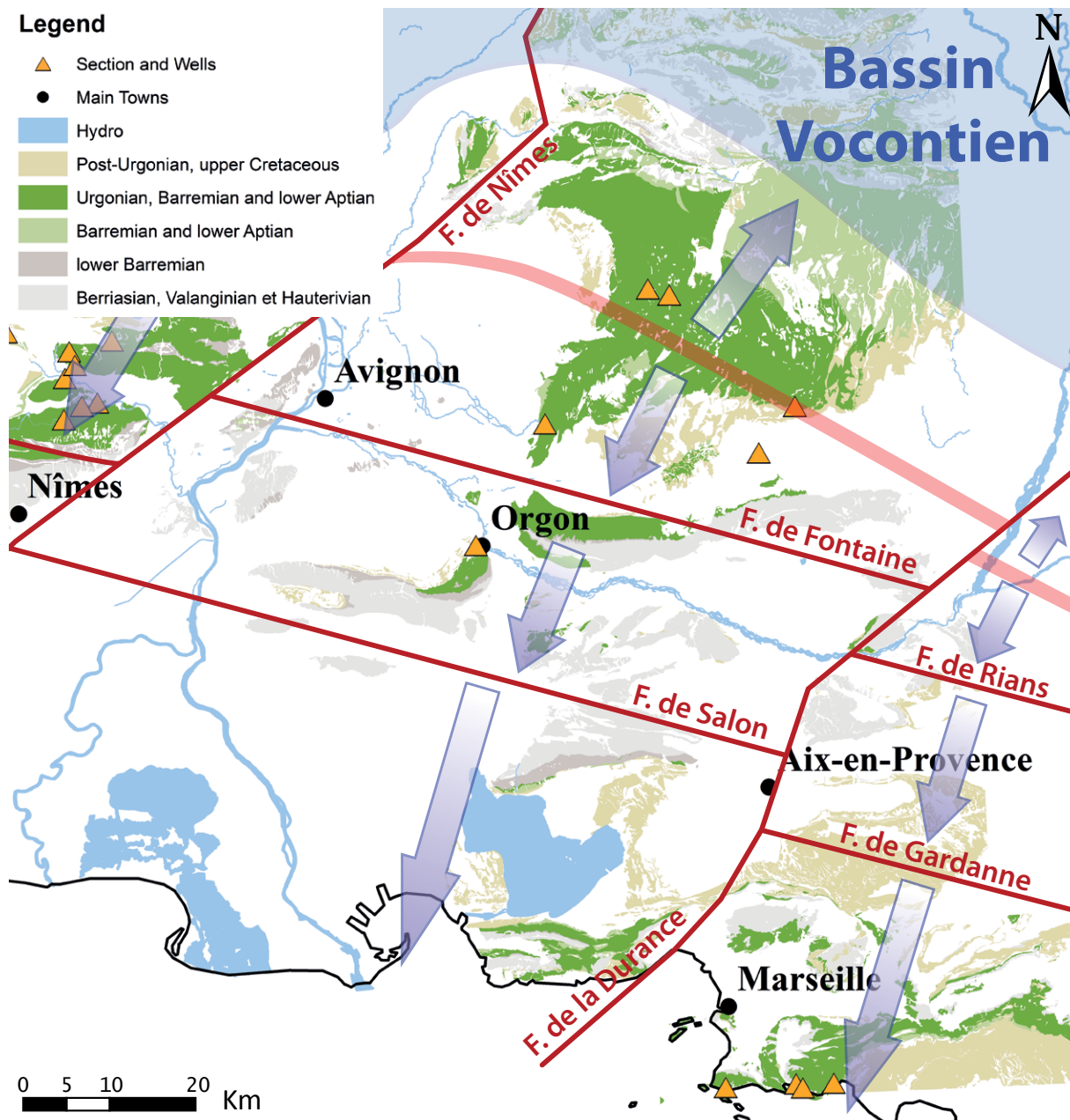


Figure 4-27 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien des secteurs de la Provence et du Vaucluse au Barrémien supérieur. Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés, les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles et les zones rouges représentent les zones de haut-fond.

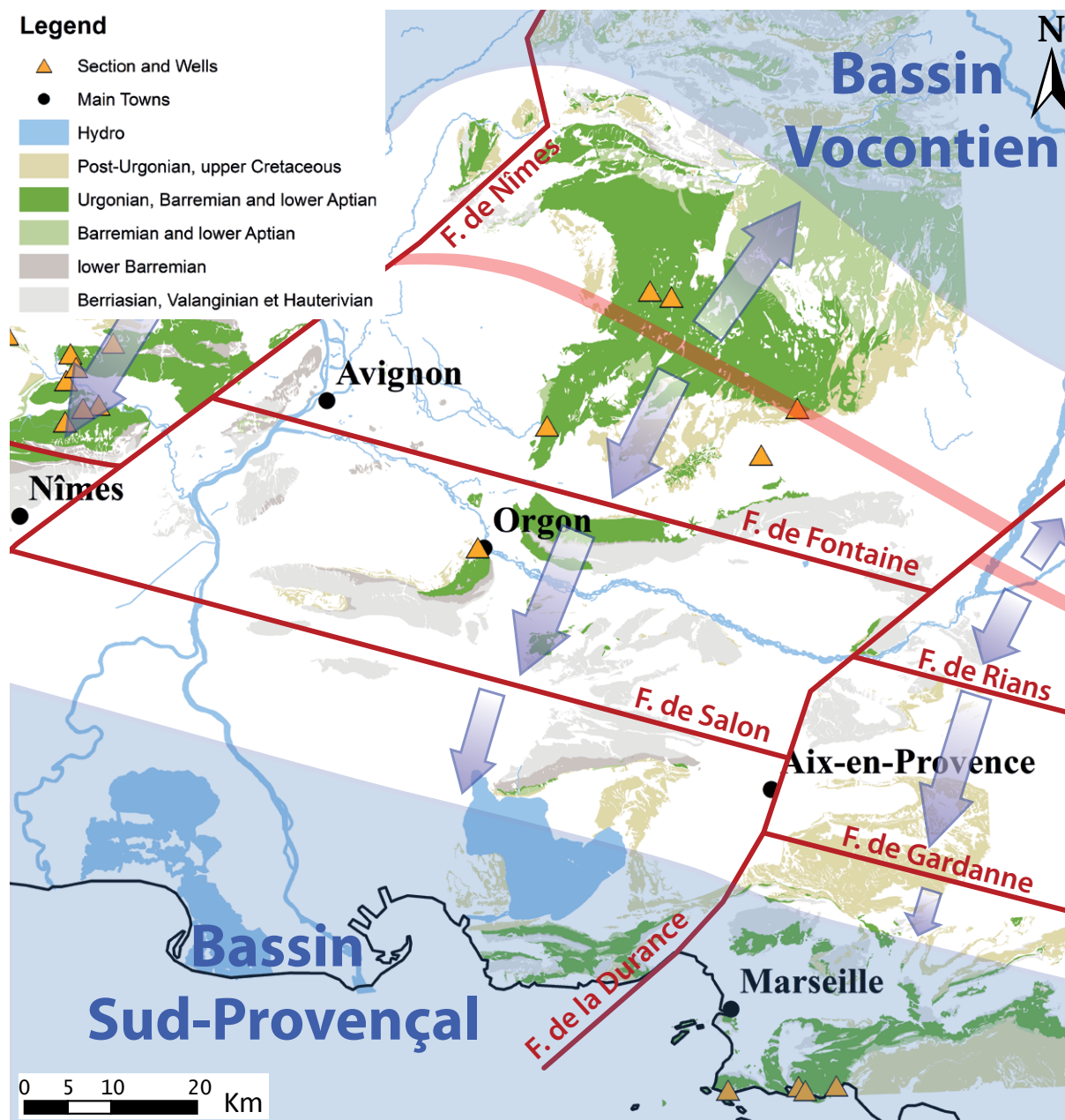


Figure 4-28 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien des secteurs de la Provence et du Vaucluse à l'Aptien inférieur, sur les bordures des bassins Vocontien et Sud-Provençal. Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés, les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles et les zones rouges représentent les zones de haut-fond.



## 6 ORGANISATION GÉNÉRALE DES SÉQUENCES URGONIENNES

Comme démontré dans le Chapitre 3, l'Urgonien du Sud-Est de la France s'est principalement développé pendant le Barrémien supérieur et l'Aptien inférieur. La synthèse du développement de l'Urgonien proposée dans ce chapitre concerne les trois séquences du Barrémien supérieur (Ba3, Ba4 et Ba5) ainsi que la première séquence de l'Aptien (A1).

La succession des faciès le long des coupes et des puits, ainsi que l'organisation des corps carbonatés (observée en panorama ou interprétée à partir des données de terrain) ont mis en évidence la progradation, non régulière dans le temps, de la plateforme urgonienne. Des «sauts» de progradation plus importants ont été identifiés entre la séquence Ba3 et la séquence Ba4, ainsi qu'entre la séquence Ba5 et la séquence A1.

Afin de concevoir un modèle de développement de la plateforme urgonienne le plus réaliste possible, plusieurs règles géométriques, dictées par les concepts de stratigraphie séquentielle (Posamentier et al., 1988) et par la progradation de la plateforme urgonienne doivent être respectées :

- Les cortèges de bas niveaux ne se développent que sur la bordure de la plateforme. Leurs limites inférieures et supérieures, respectivement limites de séquences et surfaces transgressives sont donc confondues sur la plateforme. La sédimentation y est donc, par définition, discontinue.
- Les cortèges transgressifs sont moins bien développés que les cortèges régressifs, en raison du caractère progradant de la plateforme.
- Chaque cortège forme un clinoforme.
- A l'intérieur d'une même séquence, l'épaisseur maximale du cortège transgressif a la position la plus proximale tandis que celle du cortège de bas niveau a la position la plus distale.
- D'une séquence à une autre, la position des différents cortèges avancent vers le bassin.
- Latéralement, cette avancée est plus importante entre les cortèges Ba3 et Ba4 et entre les cortèges Ba5 et A1.

Le profil de la plateforme urgonienne schématisé Figure 4-29, p. 155 regroupe l'ensemble de ces critères.





Figure 4-29 : Profil de la plateforme urgonienne. Les cortèges de bas niveau sont représentés en jaune, les cortèges transgressifs, en vert, et les cortèges de haut niveau, en orange.

## 7 PALÉOGÉOGRAPHIE GÉNÉRALE ET RÉSEAUX DE FAILLES

La paléogéographie du bassin Vocontien au Barrémien supérieur, et des bassins Vocontien et Bédoulien à l'Aptien inférieur, sont basées sur celles publiées en 1979 par Arnaud-Vanneau et al., 1979 (cf. Figure 4-30, p. 156 et Figure 4-31, p. 156).

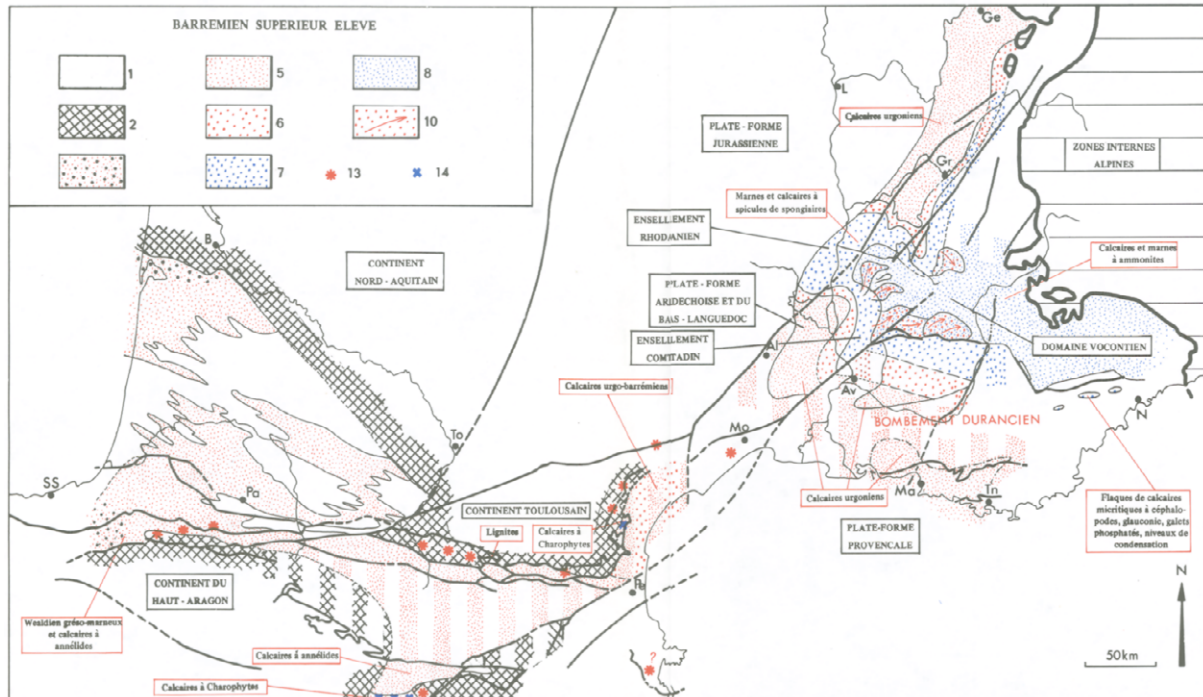


Figure 4-30 : Paléogéographie du Sud-Est de la France et du Nord de l'Espagne au Barrémien supérieur, d'après Arnaud-Vanneau et al., 1979.

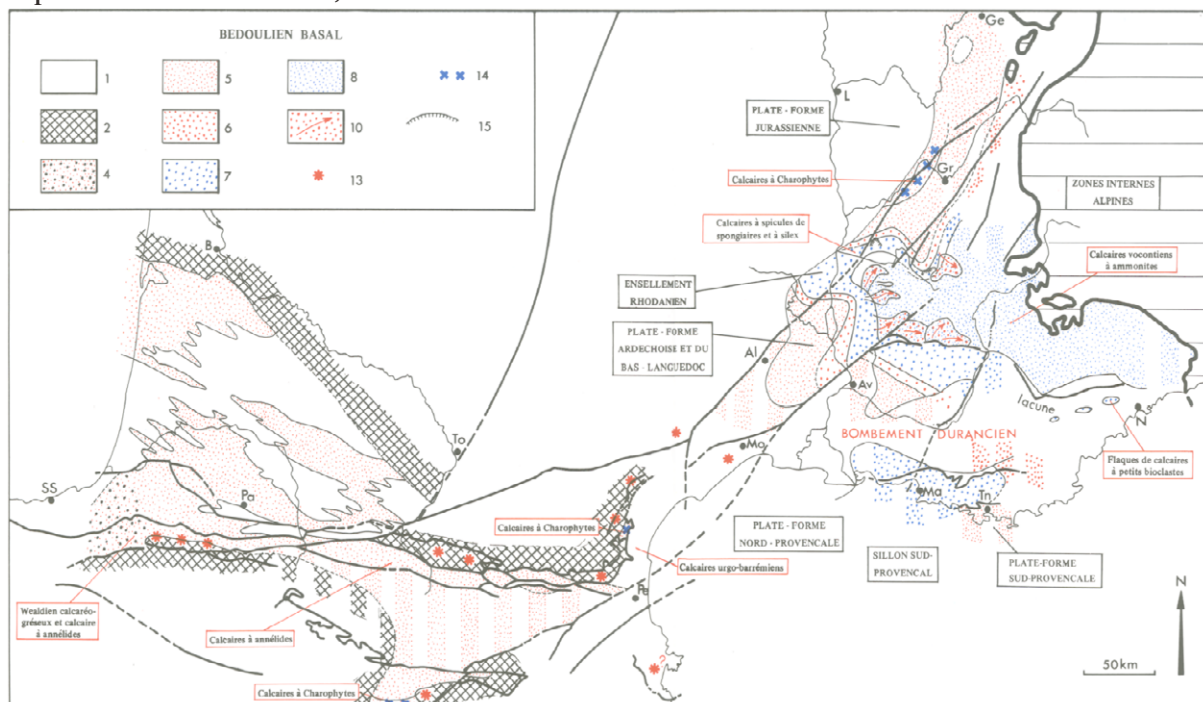


Figure 4-31 : Paléogéographie du Sud-Est de la France et du Nord de l'Espagne à la base de l'Aptien, d'après Arnaud-Vanneau et al., 1979.

Dans le chapitre précédent, l'étude des données de chaque secteur a révélé le jeu de plusieurs failles syn-sédimentaires ayant influencé la géométrie de la plateforme urgonienne.

Parmi ces failles ont été citées les failles des Cévennes, de Nîmes, de la Durance et de l'Isère. Ce sont des failles anciennes qui existaient déjà pendant la période hercynienne. Leurs jeux cénozoïques (Eocène et particulièrement Oligocène) sont les mieux documentés.

Dans le Vercors, trois failles sub-méridiennes : la faille de l'Isère, la faille de Presles-Saillant-Condorcet et la faille de Rencurel délimitent trois blocs dans lesquels des zones de haut-fond ont été localisées. Ces zones de haut-fond séparent des zones plus subsidentes au nord, proche de la faille de l'Isère, de la bordure de plateforme, au sud.

Dans le Gard, l'Ardèche, le Vaucluse et la Provence, le jeu de trois failles subméridiennes ont également été mise en évidence : La faille des Cévennes, la faille de Nîmes et la faille de la Durance, ainsi que des failles d'orientation environ N110°, il s'agit des failles de Sauzet, de Connaux, de Fontaine, de Salon, de Gardanne et de Rians. Ces failles subdivisent la bordure sud du bassin Vocontien en neuf blocs. Six d'entre eux sont basculés dans lesquels le gradient des épaisseurs et des faciès est contraire à la direction plateforme-bassin. Dans les trois autres blocs, situés sur la bordure du bassin Vocontien, les failles N110° les délimitant au sud provoquent des roll-overs, c'est à dire un affaissement puis, vers le nord, une zone de haut-fond.

Il est possible, mais non vérifié, que la faille des Cévennes, au sud, rejoigne, vers le nord, la faille de l'Isère. De même, plusieurs failles sont représentées sur les cartes géologiques de Nyons, de Dieulefit et de Die. Elles semblent raccordées la faille de Nîmes aux failles de Presles-Saillant-Condorcet et de Rencurel.

La paléogéographie des bassins Vocontiens et Bédouliens, le réseau de failles ainsi que l'organisation des dépôts urgoniens à l'intérieur de ces blocs au Barrémien supérieur, et à l'Aptien basal, sont résumés Figure 4-32, p. 158 et Figure 4-33, p. 159.

Le nom de chaque bloc, délimités par des failles, sont visibles Figure 4-34, p. 160.

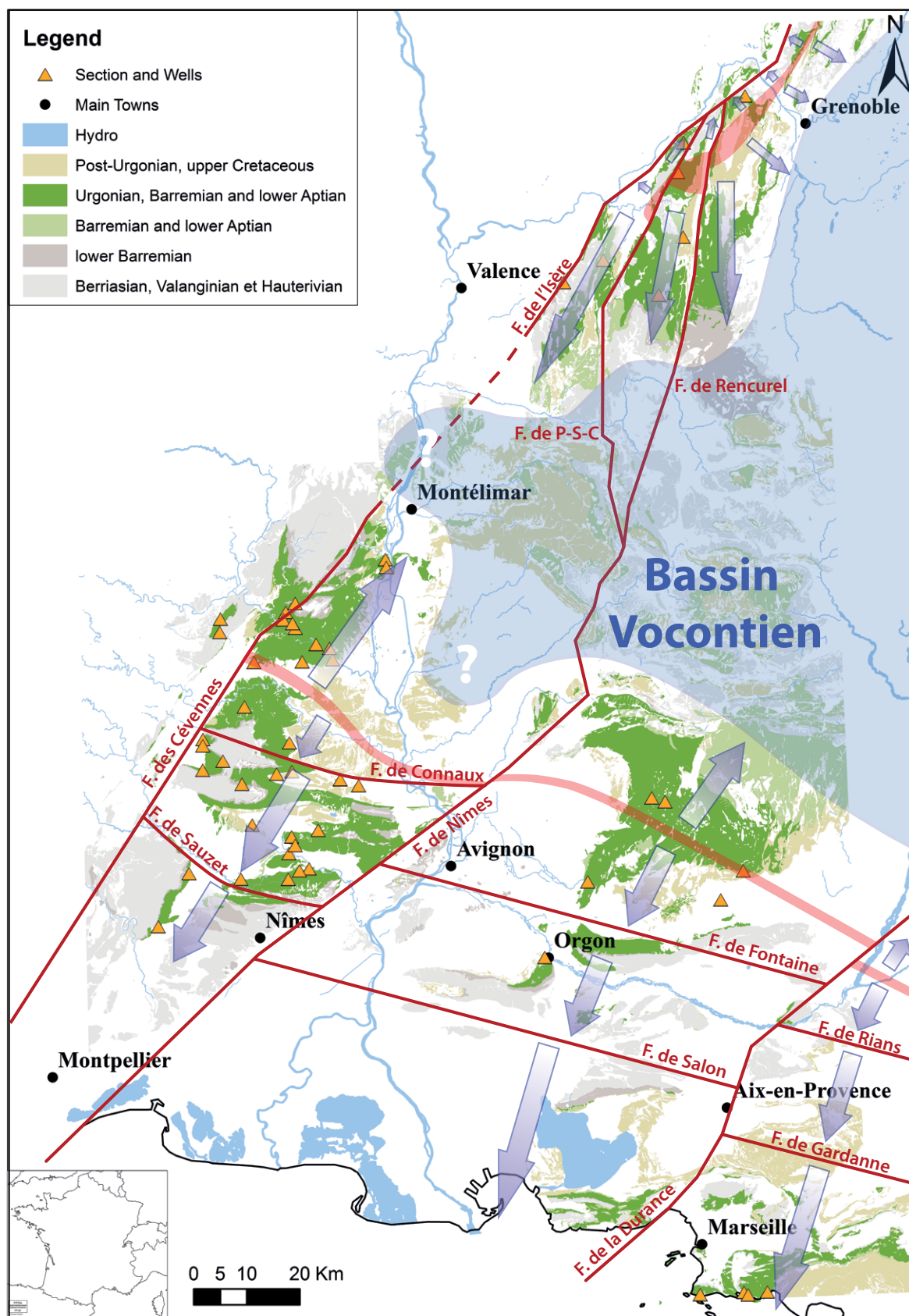


Figure 4-32 : Carte synthétique de la paléogéographie du Sud-Est de la France au Barrémien supérieur. Les traits rouges représentent les failles qui délimitent les blocs dans lesquels les sédiments urgoniens se sont déposés. Les zones rouges localisent les zones de haut-fond. Les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles. P-S-C est l'abréviation de Presle-Saillant-Condorcet.



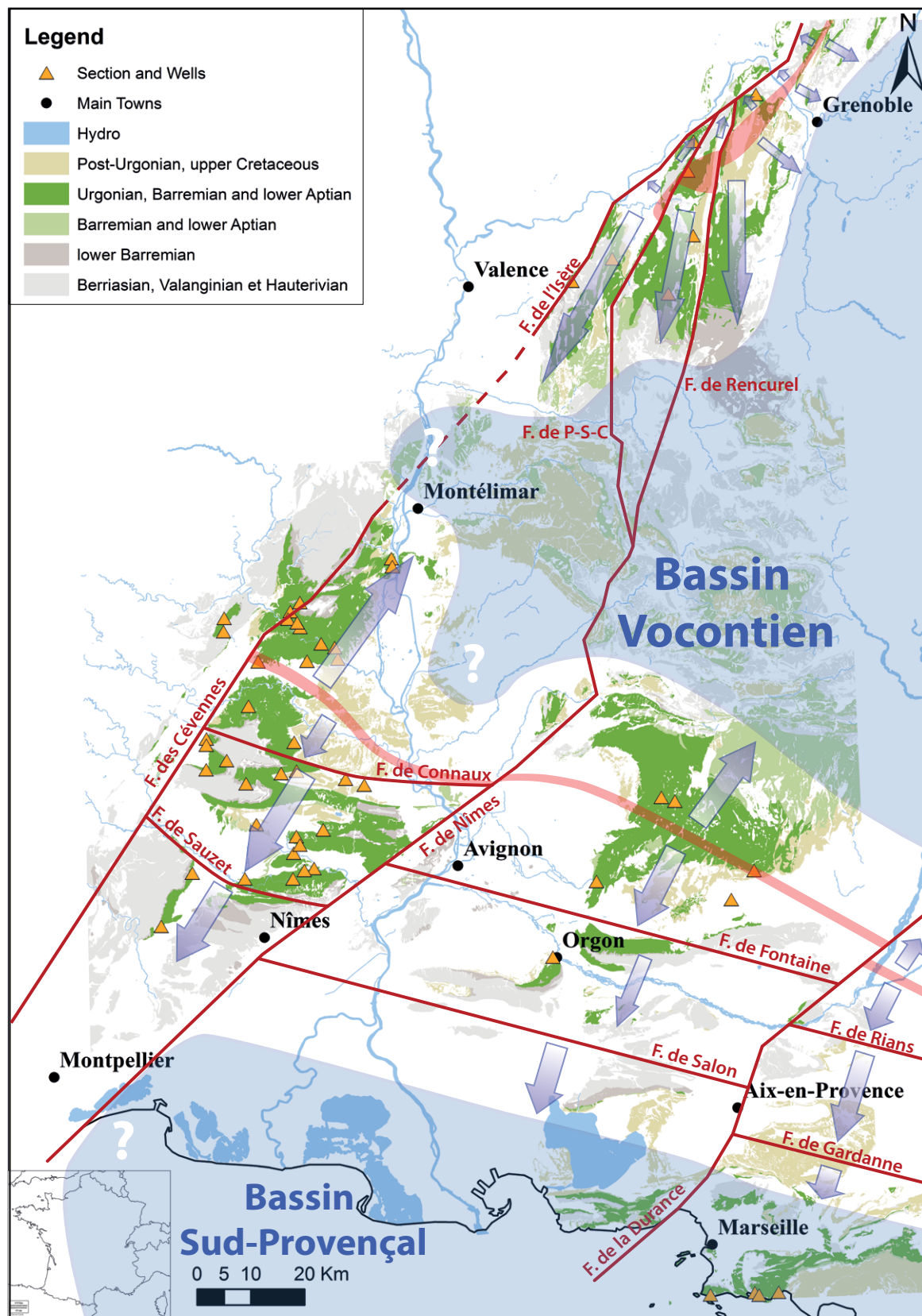


Figure 4-33 Carte synthétique de la paléogéographie du Sud-Est de la France à la base de l'Aptien. Les traits rouges représentent les failles qui délimitent les blocs dans lesquels les sédiments urgoniens se sont déposés. Les zones rouges localisent les zones de haut-fond. Les flèches bleues illustrent la subsidence induite par le jeu des failles. P-S-C est l'abréviation de Presle-Saillant-Condorcet.

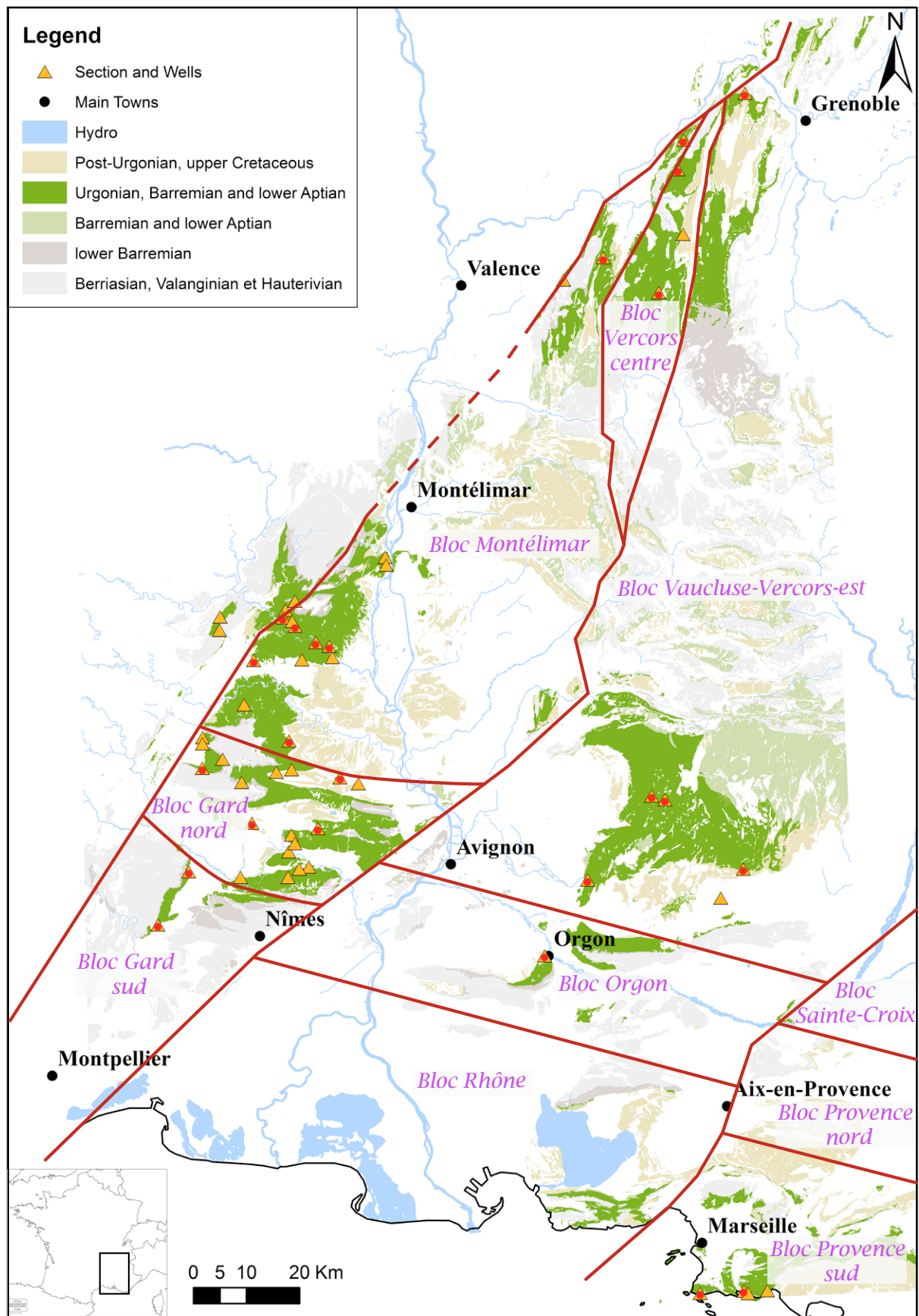


Figure 4-34 : Carte de localisation des différents blocs qui subdivisent le Sud-Est de la France.



## 8 SYNTHÈSE DES DONNÉES ET INTERPRÉTATIONS

Afin de caractériser de manière plus précise la paléogéographie du Sud-Est de la France ainsi que l'influence des failles syn-sédimentaires sur la géométrie de la formation urgonienne, des cartes d'épaisseur et de paléoprofondeur d'eau ont été construites. Douze cartes d'épaisseurs ont été créées, soit une carte pour chaque cortège de bas niveau, transgressif et de haut niveau des quatre séquences qui font l'objet de cette étude. Quatre cartes d'épaisseurs d'Urgonien érodé ont également été dessinées, soit une au sommet de chaque séquence. Treize cartes de paléoprofondeur d'eau ont été créées, soit une pour chaque surface remarquable bornant les douzes cortèges des séquences Ba3, Ba4, Ba5 et A1.

Les cartes d'épaisseur sont basées sur les données acquises aux puits, le long des coupes et sur les panoramas étudiés tout au long de cette étude. Les données de paléoprofondeur d'eau proviennent des courbes de paléoprofondeur d'eau dessinées, le long des coupes et des puits, en fonction des micro-facies observés.

Elles incluent les phénomènes de subsidence différentielles associées à la structure en blocs de la plateforme urgonienne. C'est à dire qu'à l'échelle d'un bloc, les valeurs des courbes d'épaisseur et de paléoprofondeur d'eau seront toujours moins importantes en têtes de blocs et au niveau des hauts-fonds qu'en pieds de blocs.

L'organisation générale des séquences et leur progradation vers le bassin Vocontien ont également été pris en compte lors de l'élaboration de ces cartes. Sur les bordures de la plateforme, les valeurs des courbes d'épaisseurs augmentent puis rediminuent vers le bassin afin de représenter les clinofomes. Sur la bordure sud du bassin Vocontien ainsi que sur la bordure est du Vercors, la position de la courbe dont la valeur d'épaisseur est la plus importante varie en fonction des cortèges afin de représenter la progradation de la plateforme urgonienne telle que dessinée Figure 4-29, p. 155. Dans les blocs ouest et central du Vercors, les données d'épaisseur ne permettent pas de respecter le même schéma. Ce la pourrait s'expliquer par le contexte tectonique complexe du à la proximité des failles de l'Isère, de Presles-Saillant-Condorcet et de Rencurel dans ce secteur.

Enfin, elles doivent illustrer le passage de la paléogéographie barrémienne à la paléogéographie aptienne proposées dans le paragraphe précédent.

### 8.1 LES CARTES D'ÉPAISSEURS

A la base de l'Urgonien, la Figure 4-32, p. 158 illustre le fait que la plateforme urgonienne se dépose sur les bordures du bassin Vocontien. Les données d'épaisseur et de paléobathymétrie de la séquence Ba3 et du cortège transgressif de la séquence Ba4 permettent de proposer une organisation relativement simple.

Les blocs situés les plus au sud du secteur d'étude (Gard sud, Rhône et Provence sud) sont les plus éloignés du bassin Vocontien. Par conséquent, la subsidence de ces blocs est moins importante que celle des blocs Gard nord, Orgon et Provence nord. Les valeurs d'épaisseurs et de paléoprofondeur d'eau y sont donc moins importantes. Encore plus au nord, mais toujours sur la bordure sud du bassin Vocontien, la subsidence du au jeu des failles de Connaux, de Fontaine et de Rians est moins importante que celle créée par le basculement des blocs. La valeur des courbes d'épaisseur au nord de ces failles est moins importante que celle déterminée aux pieds des blocs basculés.

Le bassin Vocontien s'ouvrant à l'est du secteur d'étude, la subsidence est plus importante d'ouest en est. Les épaisseurs sont donc moins importantes dans les blocs de Montélimar (partie sud), et de Gard nord et sud que dans les blocs du Vaucluse, d'Orgon et du Rhône, pour atteindre les épaisseurs maximales dans les blocs de Sainte-Croix, Provence nord et Provence sud.

Les blocs du Vercors sont organisés de la même manière, avec des subsidences et donc des épaisseurs, plus importantes d'ouest en est. Cette architecture reste identique pendant tout le dépôt de la série urgonienne.

A partir du cortège de haut niveau de la séquence Ba4, les données ne permettent plus de conserver cette architecture. Les épaisseurs des cortèges du puits d'Orgon, deviennent beaucoup moins importantes que celles des coupes et puits du bloc Gard nord (contrairement aux épaisseurs des cortèges précédents). Les épaisseurs plus faibles sont interprétées comme le résultat d'une subsidence moins importante du bloc d'Orgon. Cette nouvelle répartition des subsidences implique un changement dans le jeu des failles et donc, dans le régime de contrainte. Ces changements ont été interprétés comme étant les premiers signes du passage de la paléogéographie barrémienne à aptienne.

Les valeurs des courbes d'épaisseurs du bloc d'Orgon deviennent alors moins importantes que celles du bloc Gard nord. Le bloc Provence nord reste, de par la paléogéographie du bassin

Vocontien qui s'ouvre toujours vers l'est, plus subsident que le bloc d'Orgon.

En revanche, la paléogéographie aptienne impliquant l'ouverture du bassin de la Bédoule au sud, la subsidence, particulièrement du bloc Rhône, mais aussi de Provence sud, s'amplifie. Les valeurs des courbes d'épaisseur du bloc Rhône deviennent plus importantes que celle du bloc Provence sud. Les valeurs des courbes d'épaisseurs du bloc Rhône sont toujours plus importantes que celle du bloc Gard sud, mais la différence est de plus en plus importante du cortège de haut niveau de la séquence Ba4 à celui de la séquence Ba5.

Sur la bordure de la plateforme, le bloc du Vaucluse, entraîné par le mouvement du bloc Orgon, devient lui aussi moins subsident. Les épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence Ba4 dans le bloc du Vaucluse sont toujours plus importantes que celles de la partie sud du bloc Montélimar mais la différence est bien moins importantes.

La même architecture est conservée pendant le dépôt de la séquence Ba5. La subsidence des blocs Rhône et Provence sud, ainsi que l'élévation des blocs d'Orgon et de Provence nord sont de plus en plus importantes.

A partir du cortège de bas niveau de la séquence Ba5, les valeurs des courbes d'épaisseur de la partie sud du bloc Montélimar sont plus importantes que celle du Vaucluse. La différence entre les valeurs d'épaisseur du bloc Rhône et celles du bloc Gard sud est de plus en plus importante.

A l'Aptien, la subsidence, de plus en plus importante depuis le cortège de haut-niveau de la séquence Ba4, engendre le dépôt de faciès de bassin au sud du secteur d'étude. Dans les blocs Rhône et Provence sud, l'Urgonien ne s'organise plus en éventail mais en clinoformes. Les valeurs des courbes d'épaisseurs, comme sur la bordure du bassin Vocontien, augmentent vers le sud avant de diminuer à nouveau.

Pour chaque séquence, les épaisseurs des cortèges de bas niveaux, pour lesquelles aucune donnée n'a été récoltée, ont été déduites à partir des épaisseurs des cortèges transgressifs et régressif.

Les cartes d'épaisseur de chaque cortège sont visibles en annexe, paragraphe A2, de la page LXXXI à la page XCII.

## 8.2 LES CARTES D'ÉROSION

Au sommet de chaque séquence, une carte d'épaisseurs de calcaire urgonien érodé a été créée. Elles ont été dessinées de telles sortes qu'elles respectent les concepts d'évolution de la plateforme urgonienne établis lors de l'élaboration des cartes d'épaisseur.

Les épaisseurs de série urgonienne érodée sont maximales en tête de bloc et au niveau des zones de haut-fond, et diminuent vers les pieds de bloc et les bassins Vocontiens et Bédouliens.

Dans le Vercors, et au sommet des quatre séquences considérées dans cette étude, les valeurs des épaisseurs érodées sont plus importantes dans le bloc ouest que dans le bloc central et sont minimales dans le bloc est.

Sur la marge sud du bassin Vocontien, au sommet de la séquence Ba3, les valeurs d'épaisseurs érodées sont plus importantes dans les blocs Gard sud, Rhône et Provence sud que dans les blocs Gard nord, Orgon et Provence nord. Les valeurs sont encore plus faibles au niveau des zones de haut-fond des blocs Montélimar (partie sud), Vaucluse et Sainte-Croix qu'en tête des blocs basculés. La paléogéographie du bassin Vocontien, ouvert vers l'est, implique une subsidence plus importante dans cette direction et donc, des valeurs d'épaisseur d'Urgonien érodé plus importantes d'est en ouest. Les valeurs sont donc plus importantes dans les blocs Gard sud et nord et dans le bloc Montélimar (partie sud) que dans les blocs Rhône, d'Orgon et du Vaucluse. Les valeurs sont encore plus faibles dans les blocs Provence sud et nord et dans le bloc de Sainte-Croix.

Au sommet des séquences Ba5 et A1, les valeurs d'épaisseur d'Urgonien érodé sont de plus en plus faibles dans les blocs Rhône et Provence sud. En revanche, elles sont de plus en plus importantes dans les blocs Orgon et Provence nord, plus importantes que celles attribuées au bloc Gard nord. De la même manière, l'érosion est plus importante dans le bloc du Vaucluse que dans la partie sud du bloc Montélimar.

Au sommet de la séquence A1, aucun phénomène d'érosion n'affecte les blocs Rhône et Provence sud. En dehors de ces deux blocs, la répartition des valeurs d'épaisseurs d'Urgonien érodé est la même.

Les quatre cartes d'épaisseur d'Urgonien érodé sont visibles en annexe, paragraphe A2, de la page XCIII à la page XCVI.

### 8.3 LES CARTES DE PALÉOPROFONDEUR D'EAU

Il est important de préciser que ces cartes ont été créées afin d'être intégrées au modèle numérique en trois dimensions de la plateformite urgonienne (dont la réalisation est décrite dans le chapitre 5, p. 165). Pour être le plus réaliste possible, il aurait fallu dessiner les courbes d'iso-épaisseur de manière continue sur l'ensemble du secteur d'étude et représenter le jeu des failles par leur trajectoire. Or, l'objectif du modèle étant, entre autre, d'offrir une représentation de la géométrie de la plateformite urgonienne, les courbes d'iso-épaisseur de chaque cortège ont été dessinées bloc par bloc afin d'accentuer la structure en blocs basculés. En revanche, une fois la géométrie du modèle contrainte par ces courbes d'épaisseurs, rien n'empêche de représenter les variations de paléo-profondeur d'eau de la manière la plus réaliste possible. C'est pourquoi les courbes de paléo-profondeur d'eau ont été dessinées continues sur l'ensemble de la carte du Sud-Est de la France.

A l'échelle d'une séquence, les valeurs de paléoprofondeur d'eau sont minimales au niveau des limites de séquences et maximales au niveau des surfaces d'inondation maximum.

Les valeurs attribuées à chaque courbe de paléoprofondeur d'eau respectent la structure en blocs basculés et l'évolution de cette structure impliquée par les cartes d'épaisseurs et d'érosion. Sur les bordures de plateformite, la paléoprofondeur d'eau augmente vers le bassin. Au sein des blocs, elles sont minimales en tête de bloc et aux niveaux des haut-fonds et s'accroît vers les zones de subsidence plus importantes.

Afin de respecter le caractère progradant de la plateformite, les valeurs de paléo-profondeur d'eau attribuées aux différents cortèges sont de moins en moins importantes de la séquence Ba3 à la séquence A1.

Cette évolution est accentuée au niveau des blocs d'Orgon et de Provence nord à partir de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba4, alors que la subsidence de plus en plus importante dans les blocs Rhône et Provence sud implique une augmentation des valeurs de paléoprofondeur d'eau. Ces valeurs sont maximales à la séquence A1 pendant laquelle des faciès de bassin sédimentent dans ce secteur.

Les cartes de paléoprofondeur d'eau au niveau de chaque limite remarquable sont visibles en annexe, paragraphe A2, de la page xcvii à la page cix.





# Chapitre 5:

## Mise en cohérence, Modélisation 3D

### Résumé :

A partir des données (environnement de dépôt et position des limites remarquables) récoltées le long des coupes et puits au cours de cette étude et des cartes d'épaisseurs et de paléoprofondeur d'eau présentées dans le chapitre précédent, un modèle numérique en trois dimensions de la plateforme urgonienne du Sud-Est de la France, renseigné en environnements de dépôt a été réalisé.

Grâce à la méthode de modélisation, basée sur l'extrapolation d'un signal stratigraphique commun, et aux différentes options sélectionnées au fur et à mesure des étapes, le modèle obtenu représente avec réalisme la géométrie de la formation urgonienne, l'architecture interne des corps sédimentaires ainsi que la répartition des environnements de dépôts.

Ce modèle illustre la grande variabilité de l'Urgonien en fonction des secteurs. L'Urgonien des bordures et de l'intérieur des plateformes n'est pas constitué des mêmes cortèges de dépôts. Leur organisation, en cliniformes ou en éventails, est également très différente. Enfin, l'évolution des environnements de dépôts est très variée d'un secteur à un autre.

## INTRODUCTION :

Un modèle numérique est une représentation probable d'un objet construit à partir de données objectives et subjectives (hard et soft data), dans lequel il est possible de simuler des processus.

L'élaboration d'un modèle numérique en trois dimensions de la bordure du bassin Vocontien du Sud-Est de la France a deux objectifs. Le principal objectif est de tester une hypothèse sur le développement de la plateforme urgonienne en intégrant dans un même outil (le géomodeleur), l'ensemble des données provenant de différentes disciplines (sédimentologie, biostratigraphie, géochimie et géologie structurale), ainsi que des concepts géologiques nécessaires à l'extrapolation des données. De plus, un modèle numérique offre une visualisation en trois dimensions de l'objet étudié, ce qui permet de vérifier la cohérence géométrique de l'hypothèse de développement de la plateforme avancée.

Grâce aux données biostratigraphiques et géochimiques récoltées au cours de cette étude, il a été possible de démontrer que sur l'ensemble du pourtour du bassin Vocontien, la plateforme urgonienne s'est principalement développée dans le Barrémien terminal et l'Aptien basal. Ce sont donc les trois séquences appartenant au Barrémien supérieur nommées Ba3, Ba4 et Ba5 ainsi que la première séquence de l'Aptien inférieur nommée A1 qui ont été modélisées.

La modélisation a eu pour objet les associations de faciès qui correspondent à des environnements de dépôts différents (cf. chapitre 3, paragraphe 3.3, p. 78). Les faciès eux-mêmes n'ont pas été utilisés car l'objectif de la modélisation est de représenter l'évolution globale de la plateforme urgonienne. La précision apportée par les faciès n'est donc pas nécessaire. De plus, la résolution du modèle (cf. chapitre 1, paragraphe 2.1.5, p. 178) ne permet pas une telle précision.

# 1 LA MÉTHODOLOGIE gOSTRAT

Afin d'obtenir un modèle de faciès dans une grille stratigraphique la plus réaliste possible, il a été choisi d'utiliser le géomodeleur gOcad<sup>®</sup> (développé par Paradigme), associé au module complémentaire gOstrat (développé au sein de la société TOTAL). Ce module reprend les concepts développés pour le module *Neptune* (Massonnat, 1999 ; Massonnat *et al.*, 2002) en y apportant des fonctions supplémentaires notamment sur le travail des puits avant modélisation (Bouziat, 2010).

## 1.1 PRINCIPE

La méthodologie gOstrat permet d'extraire, à partir de la succession des faciès le long des puits, un signal stratigraphique commun. C'est ce signal qui est extrapolé sur l'ensemble du secteur d'étude avant d'être traduit en faciès.

Les faciès sédimentaires dépendent principalement de la paléoprofondeur d'eau au moment du dépôt (en plus de l'énergie et du contexte séquentiel qui n'ont pas été pris en compte dans cette étude). Mais, la paléoprofondeur d'eau étant une variable dépendante des trois paramètres suivants : subsidence (régionale et locale), eustatisme et taux de sédimentation, son extrapolation directe à partir des données puits sur l'ensemble du modèle n'est pas réalisable. En revanche, l'accommodation, qui correspond à l'espace disponible à la sédimentation dépendant de la subsidence et du niveau eustatique prend en compte l'ensemble de ces paramètres et est simplifiée par la Formule 5-1, p. 169. La différence de paléoprofondeur d'eau entre deux pas de temps intègre les variations d'eustatisme et de subsidence alors que l'épaisseur de sédiment déposé rend compte du taux de sédimentation. Extrapoler des valeurs d'accommodation est donc géologiquement cohérent.

**Formule 5-1 : Accommodation**  $(t_2 - t_1) = \text{Epaisseur de sédiment déposée entre } t_2 \text{ et } t_1 +$   
 $\text{Profondeur d'eau } (t_2) - \text{profondeur d'eau } (t_1)$

## 1.2 MÉTHODE

L'accommodation est dans un premier temps calculée aux puits. Pour ce faire, il faut tout d'abord déterminer la distribution des couches numériques (layers) entre deux limites stratigraphiques. Les puits sont ensuite corrélés les uns aux autres ce qui permet d'attribuer par couche numérique et par puits une valeur d'épaisseur de sédiment.

A partir des faciès intégrés aux puits, une courbe de paléoprofondeur d'eau est interprétée et une valeur attribuée à chaque limite de couche. Une accommodation peut alors être calculée par couche le long des puits.

Afin de rendre comparable les valeurs d'accommodation des différents puits dans une même couche elles peuvent être centrées, ou centrées et réduites par rapport à l'ensemble des valeurs aux puits. La moyenne de ces valeurs centrées (et réduites) est ensuite calculée par layer et extrapolée sur l'ensemble de la superficie du modèle. Elle correspond au facteur commun des accommodations centrées (et réduites) et rend compte de la subsidence affectant l'ensemble du secteur d'étude ainsi que des variations d'eustatisme.

Dans le but de normaliser cette variable, une valeur de moyenne d'accommodation (et d'écart-type) doit être attribuée en tout point du modèle. Elle doit donc être extrapolée à partir des données qui ont été calculées aux puits. Pour que l'extrapolation soit la plus juste, elle doit être orientée avec une variable externe. Or, la seule variable présente en tout point du modèle est l'épaisseur de la série étudiée. Après avoir vérifié que la corrélation entre ces deux variables est suffisante, la moyenne d'accommodation peut être extrapolée par krigeage avec dérive externe (les valeurs d'épaisseur), sur l'ensemble de la superficie du modèle.

En ajoutant cette valeur aux facteurs communs d'accommodation centrée calculés par layer, un facteur commun d'accommodation redimensionné est obtenu. Si les variables ont été centrées et réduites, la même méthode d'extrapolation doit être appliquée aux valeurs d'écart-type pour ensuite diviser le facteur commun d'accommodation par ces valeurs. Cette variable rend alors compte de la subsidence ayant affectée l'ensemble du secteur d'étude et des variations d'eustatisme, mais aussi de la subsidence régional et du taux de sédimentation en tout point du modèle.

La différence entre cette valeur de facteur commun d'accommodation et l'accommodation calculée aux puits est appelée « résidu ». En fonction de l'objet modélisé (nature du sédiment), du modèle (dimension des cellules) et de l'échelle des phénomènes à modéliser (globale, régionale ou locale) plusieurs significations peuvent lui être attribuées. Dans tous les cas, les résidus rendent compte des erreurs qui ont été faites par l'utilisateur (attribution de faciès, attribution de paléoprofondeur d'eau, découpage stratigraphique...) et des erreurs de corrélations induites par la méthodologie gOstrat qui implique que les limites d'un layer ne correspondent pas parfaitement à deux lignes temps (Pernarcic, 2002). Cette différence peut également être due aux

phénomènes allocycliques locaux (luminosité, salinité, nutriment, température, etc) qui ont un impact sur le taux de sédimentation et donc sur l'accommodation. Des compactions différentielles peuvent également influencer les valeurs des résidus. La manière de les extrapoler dépendra donc de la signification qui leur est donnée.

Une fois ajoutée aux facteurs communs d'accommodation redimensionné, une valeur d'accommodation est attribuée à chaque cellule de la grille du modèle.

Il est ensuite possible d'intégrer des cartes de paléoprofondeur d'eau au niveau de différentes couches numériques. Les valeurs d'accommodation sont alors recalculées de sorte que la différence de paléoprofondeur d'eau entre deux cartes corresponde à l'accommodation cumulée entre les deux couches numériques. Une carte de paléoprofondeur d'eau de référence suffit ensuite à traduire l'ensemble des valeurs d'accommodation en valeurs de paléoprofondeur d'eau (cf. Formule 5-1, p. 169).

Les faciès de dépôt peuvent alors être simulés en utilisant un fichier de distribution des faciès en fonction de la paléoprofondeur d'eau et un fichier poids de chaque faciès qui renseigne leurs probabilités globales.

Le schéma ci-dessous résume de manière simplifiée la méthodologie gOstrat.

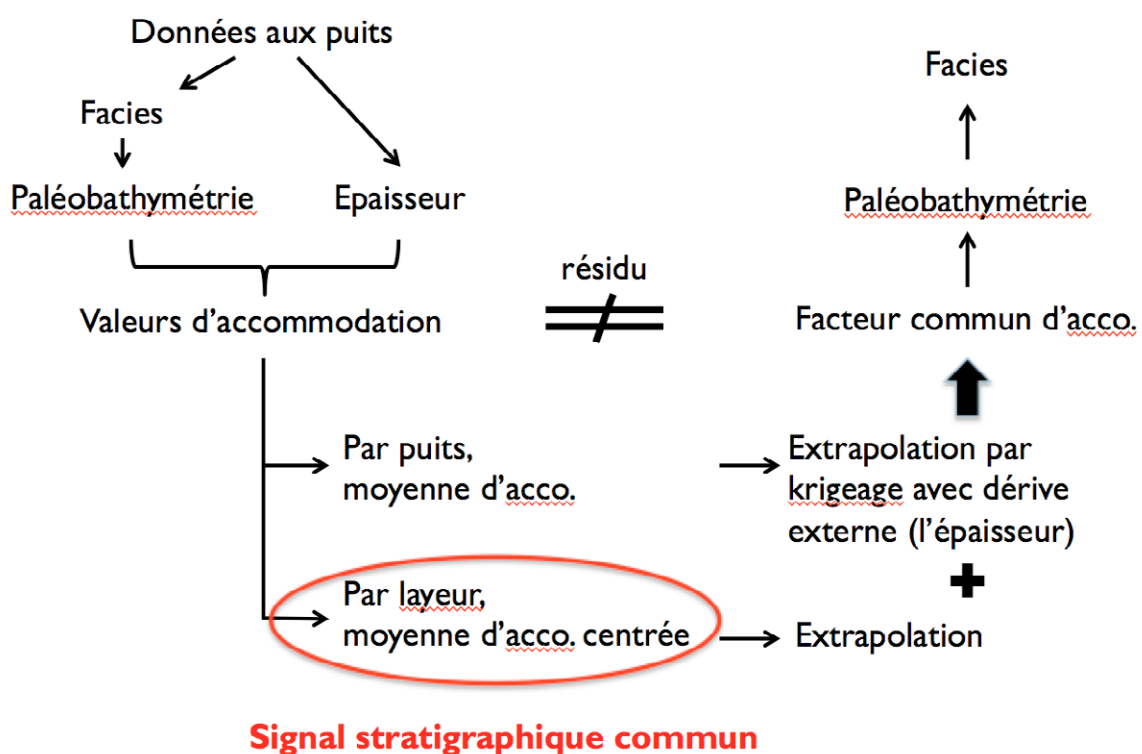


Figure 5-1 : Schéma récapitulatif de la méthodologie gOstrat.

## 2 LE MODÈLE DE L'URGONIEN DU SUD-EST DE LA FRANCE.

### 2.1 LES GRILLES STRUCTURALES ET STRATIGRAPHIQUES

#### 2.1.1 CADRE GÉOGRAPHIQUE

L'étendue géographique du modèle a été définie de sorte qu'elle englobe les cinq secteurs étudiés : le Gard, l'Ardèche, le Vercors, le Vaucluse et la Provence. La faille des Cévennes séparant deux mondes géologiques distincts a été sélectionnée comme limite ouest du modèle. Pour faciliter le maillage, les limites nord et sud ont été dessinées perpendiculairement à cette faille et de telle sorte qu'elles passent respectivement au nord du massif du Vercors et au sud du massif des Calanques de Marseille. La limite est correspond à une méridienne placée suffisamment à l'est du massif du Vercors pour pouvoir modéliser le passage de la plateforme au bassin. Un objet « surface » (cf. Lexiques, p. 242) représentant le sommet du modèle (la limite de séquence A2) a été créé à l'intérieur de ce périmètre. Le modèle a été horizontalisé sur cette surface.

Afin de représenter au mieux la géométrie de la série urgonienne, il aurait été intéressant de reconstruire la paléogéographie du Sud-Est de la France à l'époque aptienne et d'y relocaliser l'ensemble des données. Dans la littérature, aucune reconstruction suffisamment précise de l'ensemble du secteur d'étude n'existe. Pour remédier à cette lacune, il faudrait déplier l'ensemble des plis pyrénéens et alpins qui ont affecté le paysage du Sud-Est de la France, notamment les plis d'axe est-ouest qui ont déformé les séries de bassin dans les régions du Diois et du Devoluy. Il aurait également fallu repositionner certains blocs déplacés par des paléofailles qui ont eu des jeux et des rejets différents à travers les diverses périodes géologiques depuis l'Aptien jusqu'à nos jours. Suffisamment de données sont disponibles pour faire ce travail de reconstruction dans certains secteurs, mais d'autres ont malheureusement été moins bien étudiés. Afin de conserver une cohérence sur l'ensemble du secteur d'étude, aucune reconstruction n'a été réalisée. L'ensemble des données (coupes et puits) ont donc été localisées en tenant compte de leurs positions actuelles et non paléogéographiques.

#### 2.1.2 LES DONNÉES PUIITS

Comme détaillé dans le chapitre 4, 52 coupes et puits ont été étudiés ce qui a permis une bonne compréhension de la structure et de la géométrie de l'Urgonien du Sud-Est de la France. Pour la modélisation, il n'a pas été jugé utile d'intégrer toutes les données. Seuls les



coupes et puits permettant une bonne répartition géographique des données, recoupant une grande épaisseur de série, et/ou apportant des informations clés à la compréhension de l'architecture de la série urgonienne ont été utilisés. Ainsi, 22 puits et coupes ont été sélectionnés (cf. Figure 5-3, p. 175 ) et intégrés sous forme d'objets « puits » (cf. Lexiques, p. 242) dans le logiciel gOcad.

Pour chaque « puits » les coordonnées ont été renseignées en *Lambert 2 étendu*, la succession des associations de faciès sous forme de log ainsi que la position des surfaces remarquables sous forme de marqueurs. A partir de ces « puits » qui correspondent aux données observables aujourd'hui ont été construits des puits restaurés qui prennent en compte tant les failles inverses ayant engendré un redoublement de série que les épaisseurs de séries érodées sous les limites de séquences (cf. chapitre 4, paragraphe 8.2, p. 162). Des valeurs d'association de faciès allant de celle observée sous la limite de séquence jusqu'à celle regroupant les faciès se déposant dans la plus fine tranche d'eau (Association de faciès 6) ont été attribuées à ces séries manquantes. Les marqueurs renseignant la position des surfaces stratigraphiques ont ensuite été repositionnés en prenant en compte les épaisseurs ajoutées. Un exemple de restauration de puits est visible Figure 5-2, p. 173.

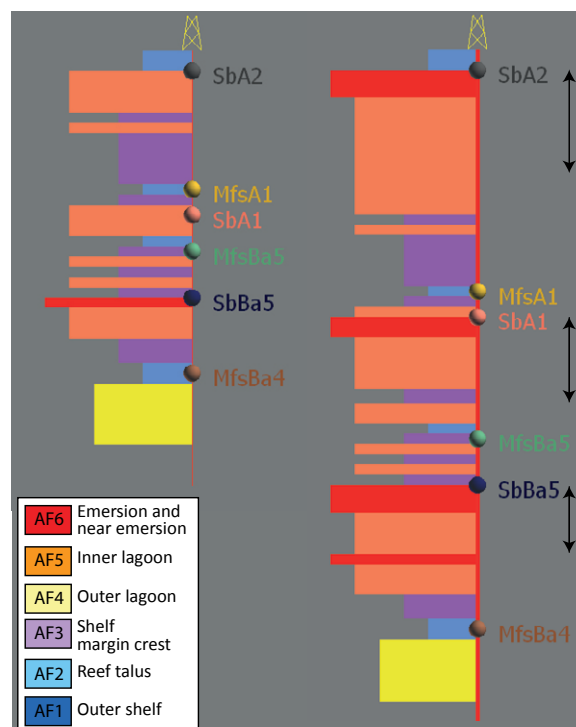


Figure 5-2 : Exemple de restauration du puits de Blanquau. A gauche le puits tel qu'observé aujourd'hui, à droite le puits restauré des épaisseurs de séries érodées représentées par des flèches noires.

En effet, afin que chaque couche représente au mieux un même temps sur les différents puits, il est nécessaire de corréliser des puits restaurés. Une fois les faciès de dépôt simulés, les épaisseurs des cellules appartenant à la zone érodée sont réduites à zéro pour revenir dans les conditions actuelles.

En calculant les différences d'altitudes entre deux marqueurs, les épaisseurs aux puits des différents cortèges ont pu être stockées dans des objets « pointsets ». Il en est de même pour les valeurs d'épaisseurs érodées aux puits.

#### 2.1.3 LE RÉSEAU DE FRACTURES ET DÉLIMITATION DES BLOCS

Afin de modéliser les failles synsédimentaires ayant un rôle dans la géométrie de l'Urgonien (cf. chapitre 4, paragraphe 7, p. 154), la carte structurale géoréférencée (cf. Figure 5-3, p. 175) a été importée dans gOcad.

Certaines variations d'épaisseurs ont été interprétées comme étant le résultat de roll-over induit par le jeu de failles normales (cf. chapitre 4) dont le profil vertical devrait par définition être courbe. Cependant, pour faciliter la création de la grille structurale, les failles ont été modélisées verticales. Elles délimitent 10 blocs dont les noms sont référencés Figure 5-3, p. 175.

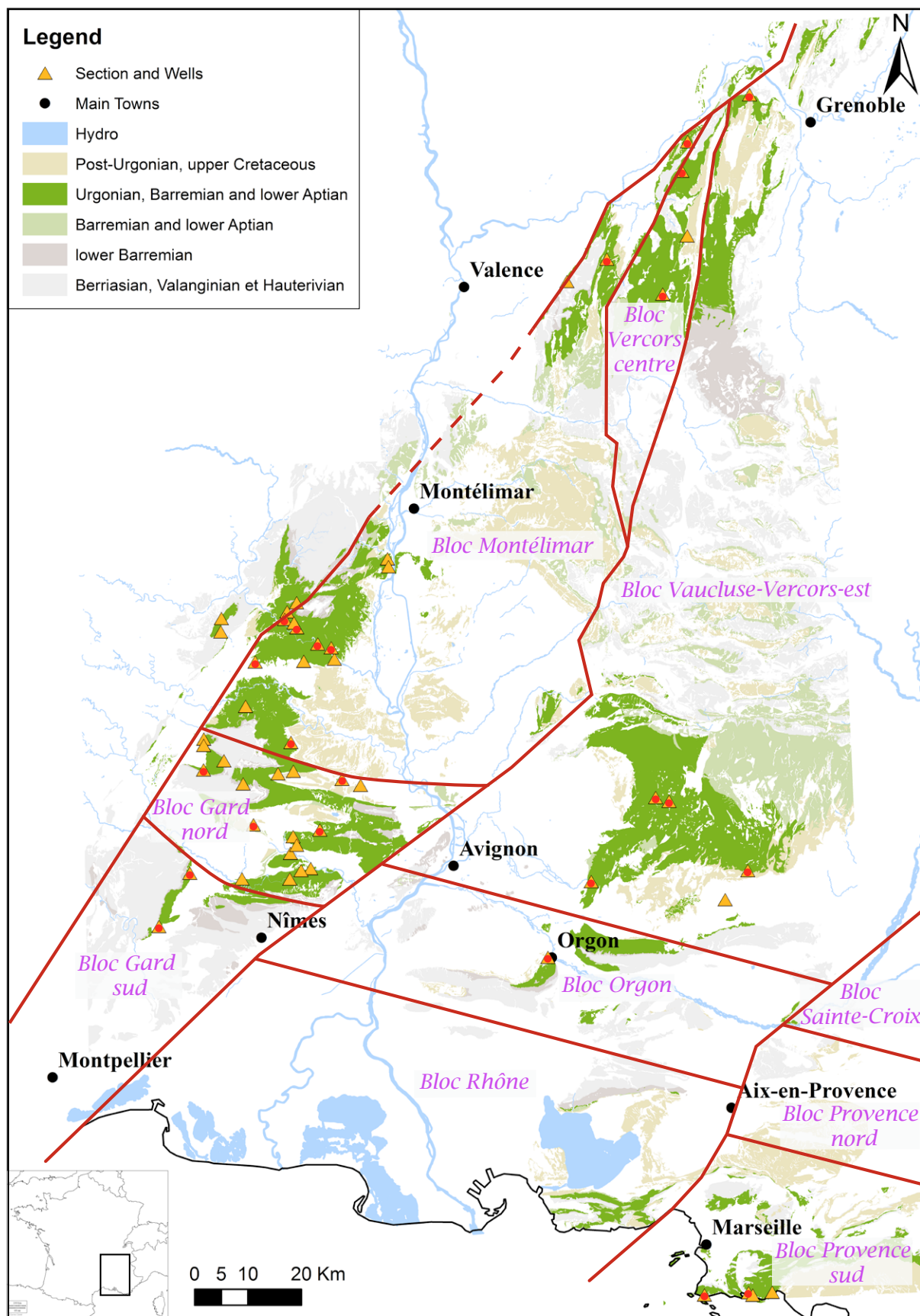


Figure 5-3 : Carte du Sud-Est de la France. Les points rouges marquent les puits et coupes sélectionnées pour la modélisation. Les traits rouges marquent le tracé des failles dessinées dans gOcad, les noms des différents blocs sont notés en violet.

#### 2.1.4 DES CARTES D'ÉPAISSEURS AUX SURFACES STRATIGRAPHIQUES

Afin que la grille stratigraphique et structurale soit la plus réaliste possible, sa construction s'est basée sur les surfaces stratigraphiques divisant la série urgonienne en cortèges sédimentaires. L'altitude de ces surfaces a été déduite à partir de celle de la surface SbA2 à laquelle est soustraite l'épaisseur du ou des cortège(s) qui les sépare(nt). La valeur d'épaisseur de chaque cortège doit donc être connue en tout point du secteur à modéliser. Un outil disponible dans le module gOstrat permet à partir de courbes d'iso-épaisseurs et de données ponctuelles d'interpoler une propriété sur l'ensemble de la superficie d'un objet «voxet » (cf. Lexiques, p. 242). Un tel objet a donc été créé, englobant largement le secteur d'étude afin d'éviter les effets de bordure.

Comme argumenté dans le chapitre 4, les failles délimitent le modèle en 10 blocs distincts et contrôlent les variations d'épaisseur à l'intérieur de ces blocs. Il est certain que la frontière entre deux blocs n'est dans la réalité pas une simple faille rectiligne et que les variations d'épaisseur aux abords de ces frontières se font de manière progressive. Mais, pour pouvoir représenter aisément l'effet de ces failles sur la géométrie de la série urgonienne, les valeurs d'épaisseurs ont été attribuées bloc par bloc de telle sorte que celle d'un bloc n'influence pas celle des blocs adjacents. Une propriété par bloc, pour chaque cortège sédimentaire a été créée, dans laquelle les valeurs d'épaisseurs ont été interpolées. Les courbes d'isovaleur utilisées sont visibles sur les cartes d'épaisseurs argumentées dans le paragraphe 8.1 du chapitre 4, p. 160.

Pour un même cortège sédimentaire, chaque propriété d'épaisseur du «voxet» a été transférée dans la « région » de la surface « SbA2 » (surface supérieure délimitant le modèle) correspondant à la localisation du bloc considéré. Cette surface possède alors en tout point une valeur d'épaisseur de chaque cortège. Les surfaces stratigraphiques ont ainsi pu être créées en déduisant de ces valeurs d'épaisseurs l'altitude de chaque surface.

Il est important de préciser que l'ensemble des cartes ont été dessinées sur un fond de géographie actuelle. Le tracé de certaines courbes d'isovaleur compense partiellement et imparfaitement le mouvement induit par les failles et les plis ayant affecté la géométrie initiale de l'Urgonien.



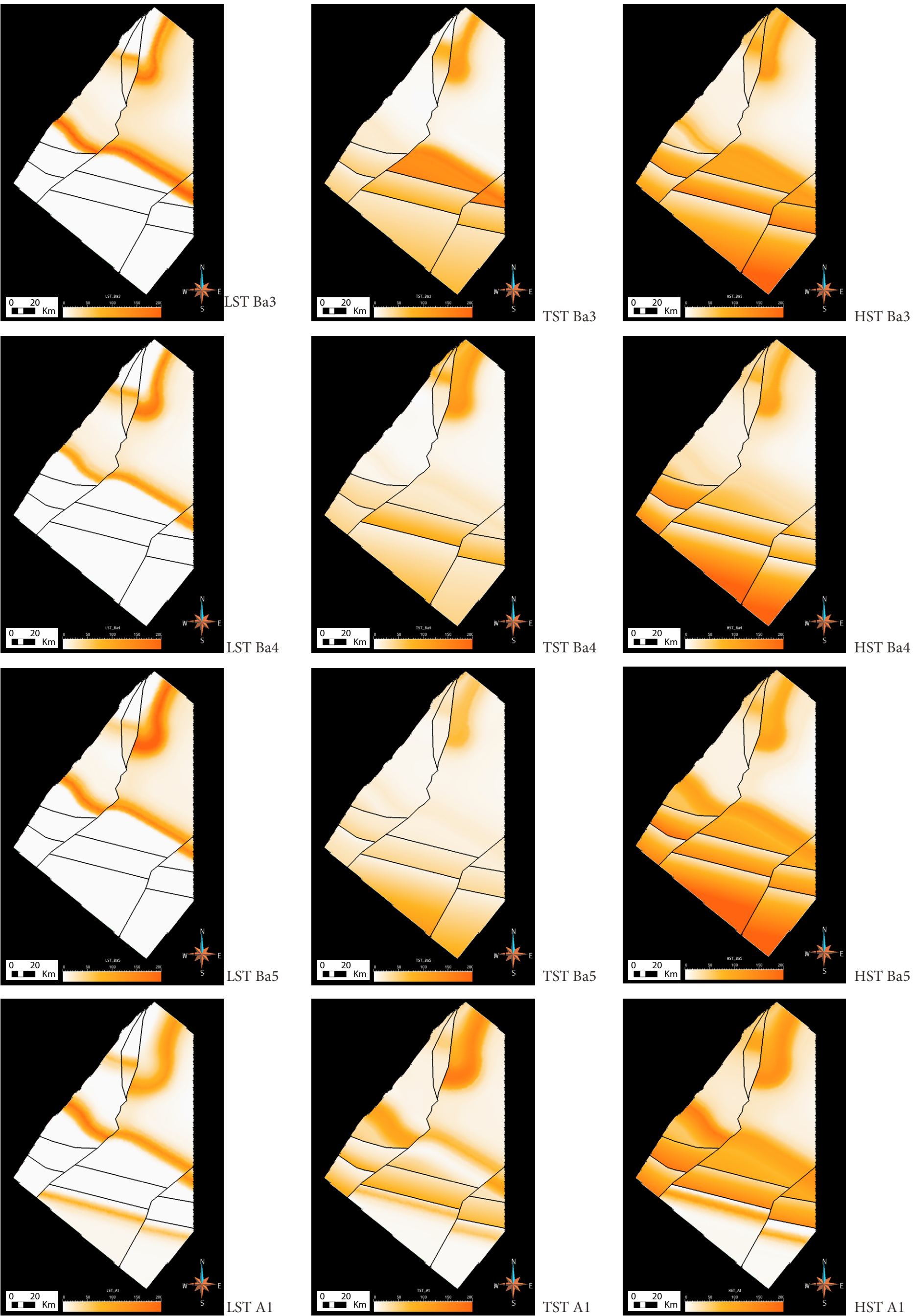


Figure 5-4 : Cartes d'épaisseurs de chaque cortège sédimentaire. L'échelle comprend des valeurs de 0 à 200 mètres, respectivement du blanc au orange foncé.

C'est particulièrement le cas au niveau de la faille de la Cléry dans le Vercors qui a provoqué un important décrochement du compartiment sud vers le sud-ouest (Arnaud, 1971). De même, les courbes d'isovaleur d'épaisseurs dans le bassin prennent en compte le raccourcissement engendré par les plis qui affectent la région se situant entre le Vercors et le Vaucluse. Les cartes d'épaisseurs ainsi créées sont visibles Figure 5-4, p. 177.

#### 2.1.5 CRÉATION DE LA GRILLE STRUCTURALE

Grâce au workflow « 3D reservoir grid builder », la grille a été construite autour de ces surfaces en prenant également en compte les « surfaces » représentant les failles. A cette étape de la modélisation, il a fallu choisir la géométrie et le nombre de couches numériques par cortège ainsi que la résolution horizontale du modèle.

Ces choix sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Cortèges	Nombre de couche	Géométrie des couches
HST A1	35	Parallèle au sommet
TST A1	30	Parallèle au sommet
LST A1	35	Parallèle au sommet
HST Ba5	50	Proportionnel
TST Ba5	20	Proportionnel
LST Ba5	30	Parallèle au sommet
HST Ba4	45	Proportionnel
TST Ba4	25	Proportionnel
LST Ba4	30	Parallèle au sommet
HST Ba3	45	Proportionnel
TST Ba3	25	Proportionnel
LST Ba3	30	Parallèle au sommet

Tableau 5-1 : Tableau récapitulatif des options de construction choisies pour chaque cortège sédimentaire.

En ce qui concerne la géométrie des couches à l'intérieur d'un même cortège, trois options sont proposées (cf. Figure 5-5, p. 179) :

- Proportionnelle : les couches sont parallèles aux surfaces représentant le sommet et la base du cortège sédimentaire. Cette option permet de représenter des dépôts en éventail.
- Parallèle à la base : les couches sont parallèles à la surface représentant la base du cortège sédimentaire. Cette option permet de représenter des toplaps.
- Parallèle au sommet : les couches sont parallèles à la surface représentant le sommet du



cortège sédimentaire. Cette option permet de représenter des onlaps.

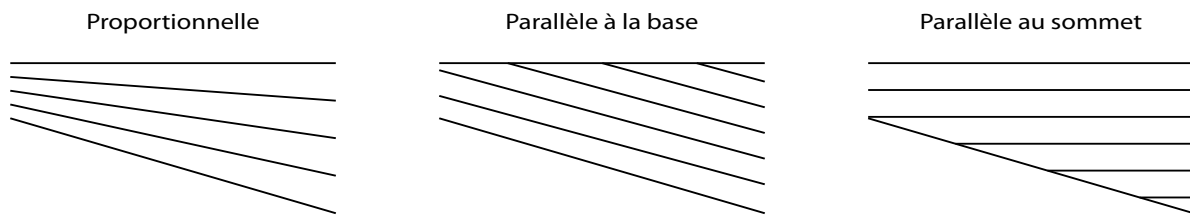


Figure 5-5 : Représentation des trois options de géométrie des couches numériques entre deux surfaces stratigraphiques.

L'idéal aurait été de pouvoir choisir la géométrie des couches numériques par cortège et par bloc mais le workflow « 3D reservoir grid builder » ne permet qu'une différenciation verticale. Un compromis a donc été concédé pour essayer de représenter au mieux la géométrie de la plateforme urgonienne. Pour les LST, l'option « parallèle au sommet » qui permet de représenter des onlaps a été choisi. C'est en effet un caractère géométrique important qui caractérise cet intervalle stratigraphique. Pour les TST et HST des séquences du Barrémien (Ba3, Ba4 et Ba5), les dépôts se faisant en éventail dans la plupart des blocs, c'est l'option « proportionnelle » qui a été choisit. A l'Aptien, les sédiments se déposant sous forme de clinoformes dans les blocs « Rhône » et « Provence sud » et la différence d'épaisseur entre les têtes et pieds des blocs « Orgon » et « Provence nord » étant moins importante, c'est l'option « parallèle au sommet » qui a été choisi.

Le maillage de la grille a été construit avec une orientation de 40° afin qu'il épouse au mieux le profil des failles principales (faille des Cévennes, faille de Nîmes et faille de la Durance).

Les dimensions horizontales des cellules est de 1500 x 1500 mètres.

Le modèle est constitué de 6 384 000 Cellules.

La grille ainsi construite est visible Figure 5-6, p. 180.

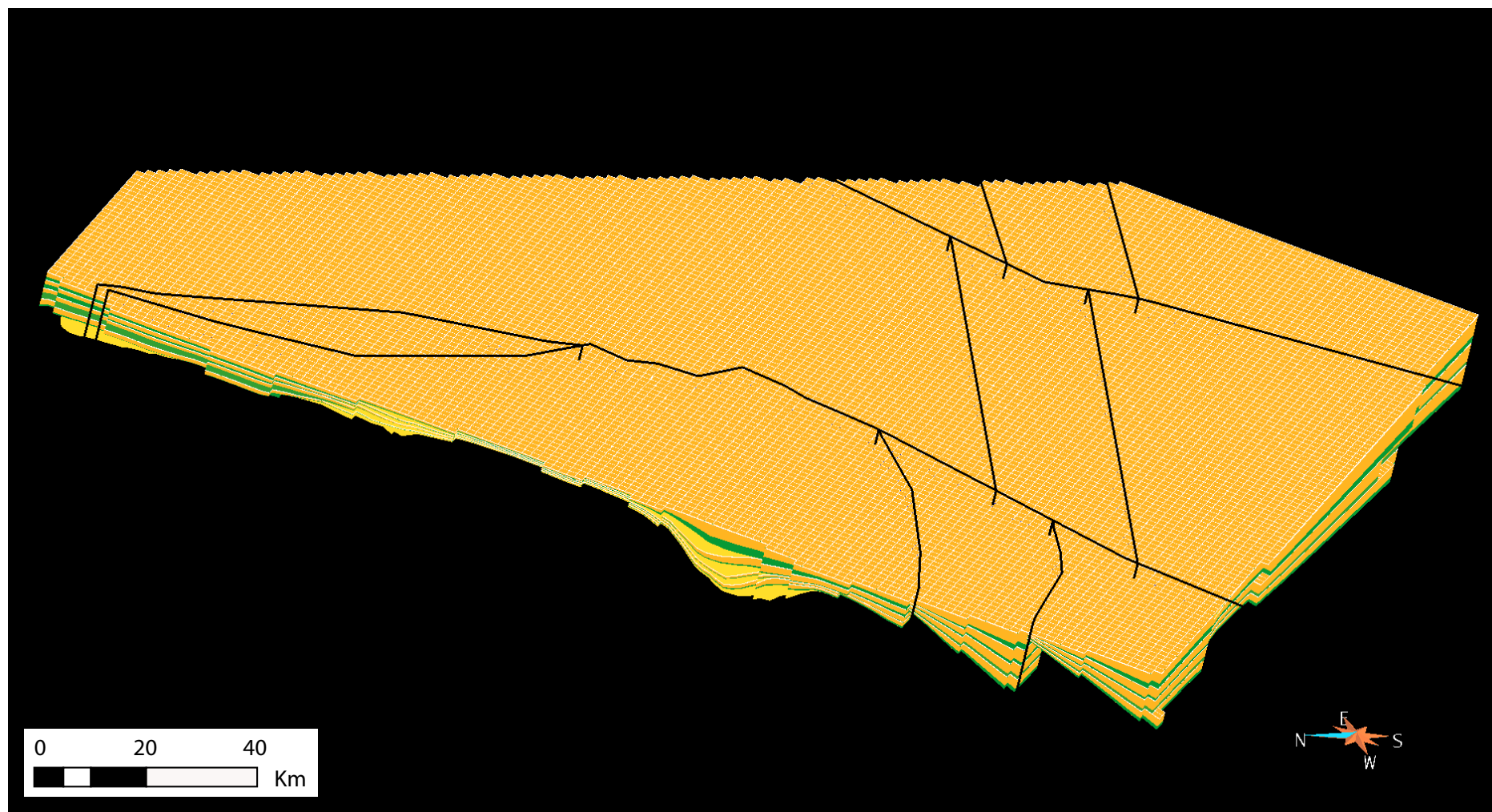


Figure 5-6 : Grille structurale de l'Urgonien du Sud-Est de la France. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent au cortège de bas niveau, celles coloriées en vert au cortège transgressif et celles coloriées en orange au cortège de haut niveau. L'exagération verticale est de facteur 15.

## 2.2 LES MODÈLES EN FACIÈS DE DÉPÔT

Une fois les grilles construites, il a été possible d'appliquer la méthodologie gOstrat afin de renseigner chacune d'elle en faciès.

### 2.2.1 1D : DU FACIÈS À LA PALÉOPROFONDEUR D'EAU

La première étape est de traduire la succession des faciès aux puits en courbe de paléoprofondeur d'eau. Ceci a été réalisé sur le module « Strat-Up » du logiciel « WakeUp » développé au sein de la société TOTAL par Gérard Massonnat. Dans un premier temps, les distributions de chaque association faciès en fonction de la paléoprofondeur d'eau basées sur le modèle de faciès utilisé pour l'ensemble de cette étude (cf. chapitre 3, paragraphe 3.3, p. 78) y ont été intégrées. Le module Strat-Up crée alors une première courbe de paléoprofondeur d'eau. C'est une courbe en créneaux passant par tous les maximums de probabilité d'apparition de chaque faciès. Afin de lisser cette courbe, la méthode de régression polynomiale de Savinztky-Golay avec un ordre polynomial de 7 a été utilisée. Son profil a ensuite été redessiné au niveau des surfaces stratigraphiques afin de rester cohérent avec les concepts de stratigraphie séquentielle. Un exemple d'une courbe de paléoprofondeur d'eau réalisée sur WakeUp est visible en Figure 5-7, p. 181.

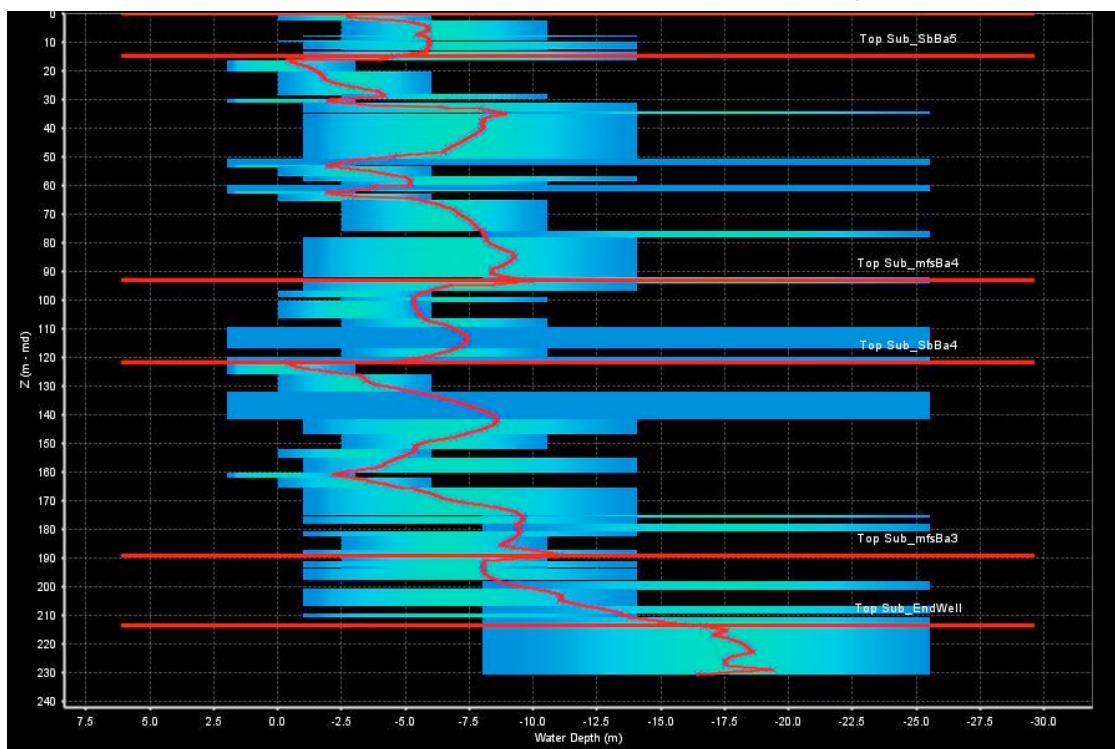


Figure 5-7 : Exemple d'une courbe de paléoprofondeur d'eau (courbe rouge) créée pour la coupe des Angostrines (Gard). Les traits rouges horizontaux représentent les surfaces stratigraphiques, les rectangles représentent la distribution de l'association de faciès déterminée aux puits et la couleur verte représente la tranche de profondeur d'eau dans laquelle la probabilité d'apparition de ce faciès est maximale. Une fois ces courbes créées, elles ont été réintégrées sous forme de « log » dans les objets « puits » correspondants.

### 2.2.2 MULTI-1D : DE LA PALÉOPROFONDEUR D'EAU À L'ACCOMMODATION

Les corrélations entre les différents puits ont ensuite été réalisées grâce à l'outil « corrélation » du module gOstrat. Cet outil permet de relier les « marqueurs » (positionnés aux puits) de même nom et de définir le nombre de couches numériques que l'on veut attribuer à chaque cortège sédimentaire : le même que celui défini lors de la construction de la grille (cf. chapitre 1, paragraphe 2.1.5, p. 178). Chaque couche représente alors un intervalle de temps géologique. Une fois les corrélations dessinées, de nouveaux puits chronostratigraphiques sont créés dans un référentiel temps et non plus profondeur (cf. Figure 5-8, p. 183). Basée sur ces puits, une grille chronostratigraphique ayant la même étendue géographique que la grille structurale est également établie. Sa particularité consiste en l'alignement horizontal de l'ensemble des couches numériques dans un espace paramétrique de Wheeler. Un objet « pointset » qui rassemble l'ensemble des données connues aux puits (faciès, profondeur d'eau, et épaisseur sédimentée) est également créé. Une valeur d'accommodation peut alors être calculée pour chaque couche numérique et par puits (Formule 5-1, p. 169 où l'indice de temps  $t_1$  correspond au « point » (cf. Lexiques, p. 242) de la couche considérée et l'indice de temps  $t_0$  au « point » sous-jacent).

Les puits étant positionnés à l'intérieur de la plateforme urgonienne où les cortèges de bas niveau ne sont pas présents, les marqueurs correspondant aux limites de séquences et aux surfaces de transgression y sont quasiment confondus. Un espace vertical de 0.1 mètre les sépare, gOcad ne permettant pas que deux marqueurs soient exactement confondus.

Les couches numériques attribuées aux cortèges de bas niveau sont donc comprises entre ces deux marqueurs. De part la méthode de calcul, des données de faciès, de paléoprofondeur d'eau et d'épaisseur y sont calculées mais elles n'ont aucun sens géologique. Les valeurs d'accommodation calculées dans les couches du LST ainsi que dans la première couche du TST n'ont, par conséquence, pas de sens non plus. Étant donné qu'au niveau des puits les cellules du LST ont dans la grille structurale une épaisseur proche de zéro, il n'est pas nécessaire d'y recalculer une accommodation cohérente. Dans ces couches, ainsi que dans la première couche du TST, il a été décidé de n'attribuer aucune valeur d'accommodation.

Seuls les marqueurs «Sb Ba3» et «TS Ba3» des puits de Serrou et de Cire-Nesque, où le cortège de bas niveau de la séquence Ba3 a été rencontré, sont distants de plusieurs mètres. Des valeurs d'accommodation ont donc pu y être calculées.

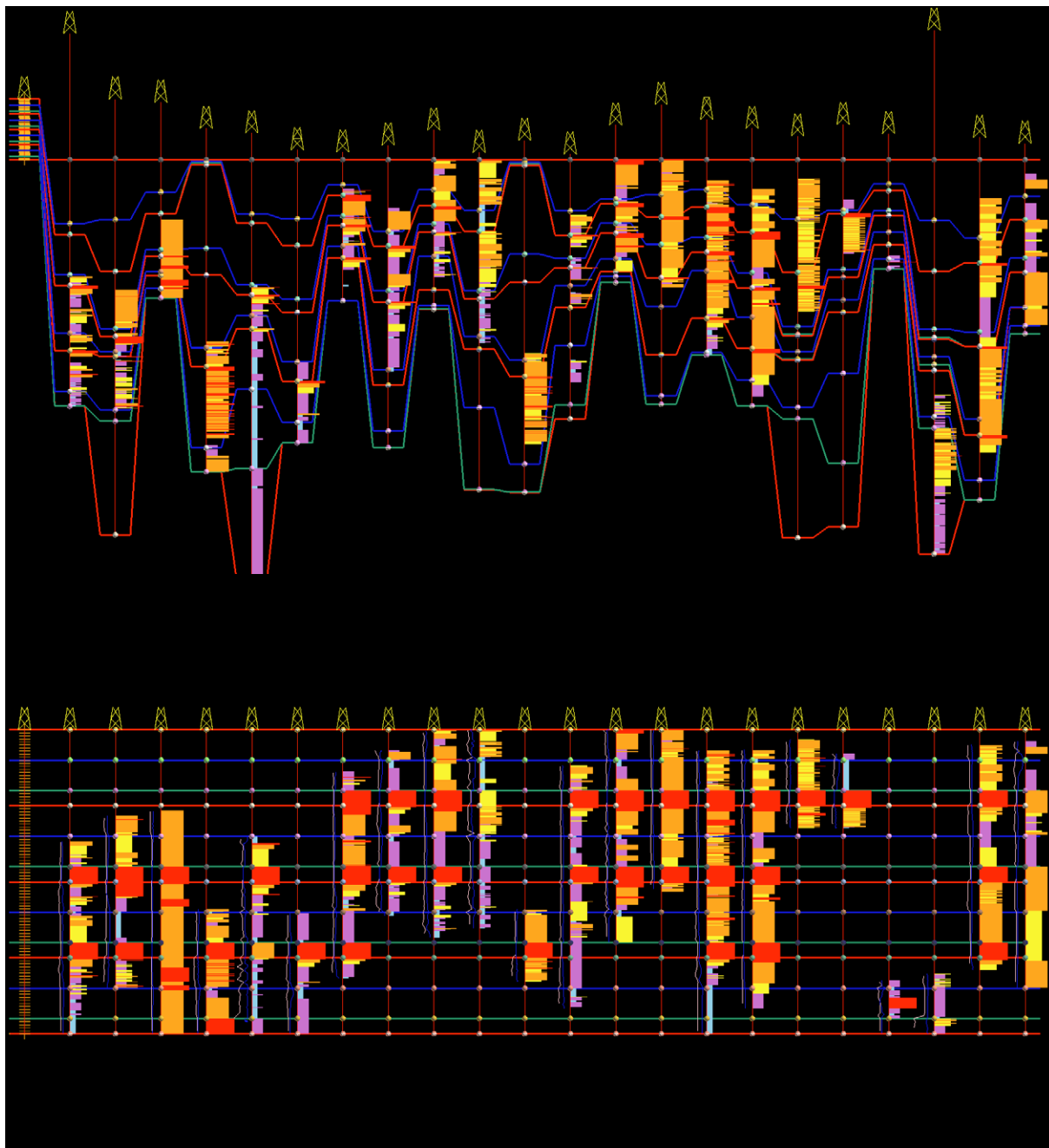


Figure 5-8 : Représentation des corrélations des différents puits dans l'espace réel (en haut) et dans l'espace paramétrique temps (en bas). Les courbes rouges représentent les limites de séquences, les vertes les surfaces transgressives et les bleues les surfaces d'inondation maximum. A gauche est représenté le référentiel paramétrique sur lequel le nombre de couches numériques attribuées par cortège est défini. Les autres puits sont placés par ordre alphabétique.

### 2.2.3 3D : EXTRAPOLATION DE L'ACCOMMODATION

A partir de ces données d'accommodation contenues dans l'objet « pointset » nommé « kriging server », une moyenne d'accommodation par puits et par séquence ainsi qu'une moyenne centrée, par couche numérique ont été calculées. Cette dernière moyenne a été centrée afin de rendre comparable les valeurs d'accommodation des différents puits, quelque soit leur présence

sur la plateforme urgonienne. Cela permet d'extraire de l'ensemble des puits, un signal stratigraphique commun.

Chaque valeur de moyenne centrée a été extrapolée dans la grille chronostratigraphique, dans l'ensemble des cellules de la couche dans laquelle elle a été calculée. Les valeurs des moyennes d'accommodation par puits et par séquence ont été comparées aux valeurs d'épaisseur des séquences correspondantes afin d'obtenir le coefficient de corrélation qui lie ces deux variables. Les coefficients obtenus sont de 0.86 pour la séquence A1, 0.69 pour la séquence Ba5, 0.64 pour la séquence Ba4 et de 0.84 pour la séquence Ba3. La valeur de ces coefficients est suffisamment importante pour permettre une extrapolation de la moyenne d'accommodation cohérente. Les valeurs plus faibles obtenues pour les séquences Ba4 et Ba5 en comparaison de celles obtenues pour les séquences Ba3 et A1 peuvent s'expliquer par un nombre bien supérieur de données.

Pour rendre les valeurs d'accommodation parfaitement comparables, en plus de les centrer, il a été question de les réduire, c'est-à-dire de les diviser par la valeur de l'écart-type de l'ensemble des valeurs aux puits. Une valeur d'écart-type a donc été calculée par puits. Elles ont ensuite été comparées avec les valeurs d'épaisseur, toujours seule variable présente en tout point du modèle. Les coefficients de corrélation obtenus pour les quatre séquences étaient inférieurs à 0.5. La relation entre ces deux variables ne permet donc pas l'extrapolation des valeurs d'écart-type. Sans valeur d'écart-type en tout point du modèle, il n'aurait pas été possible de redimensionner les valeurs de facteur commun extrapolées sur l'ensemble de la grille. Il a donc été décidé de ne pas réduire les variables.

Les valeurs de moyenne d'accommodation aux puits ont été extrapolées par krigeage avec dérive externe en utilisant ces coefficients de corrélation et un variogramme gaussien dont la portée a été défini à 8000 mètres. Une grille de moyenne d'accommodation par séquence, dont chaque layer est identique, a ainsi été obtenue (cf. Figure 5-9, p. 186). Ces valeurs ont ensuite été additionnées aux valeurs de facteur commun d'accommodation centré. Une valeur de facteur commun redimensionné est alors renseignée dans les cellules de la grille qui contenaient une valeur d'accommodation. Les autres cellules restent sans donnée. Cette variable rend compte de la subsidence affectant l'ensemble du secteur d'étude et des variations d'eustatisme, mais aussi de la subsidence régionale et du taux de sédimentation.

La différence entre la valeur d'accommodation et la valeur du facteur commun redimensionné est appelée « résidu ». L'objectif de la modélisation étant de représenter l'évolution globale



de la plateforme, ces résidus ont été considérés comme étant dus aux erreurs d'interprétation de l'utilisateur (attribution de faciès, de paléoprofondeur d'eau, découpage séquentiel, ...) et de méthode (nombre et distribution des couches entre les surfaces stratigraphiques). Par conséquent, elles n'ont de sens qu'aux puits et n'ont donc pas été extrapolées.

En revanche, une étude détaillée de ces résidus a été menée afin de critiquer la théorie d'évolution de la plateforme proposée (cf. chapitre 1, paragraphe 3•3, p. 235). En effet, pour chaque valeur d'accommodation, si la proportion de résidu est plus importante que celle de facteur commun, cela implique que les concepts géologiques intégrés aux différentes étapes de la modélisation n'expliquent pas ou peu les variations de paléoprofondeur d'eau responsable des faciès de dépôt observés.

Une valeur d'accommodation est calculée dans chaque cellule de la grille en additionnant la valeur de facteur commun redimensionné et la valeur de résidu (cf. Figure 5-10, p. 187).

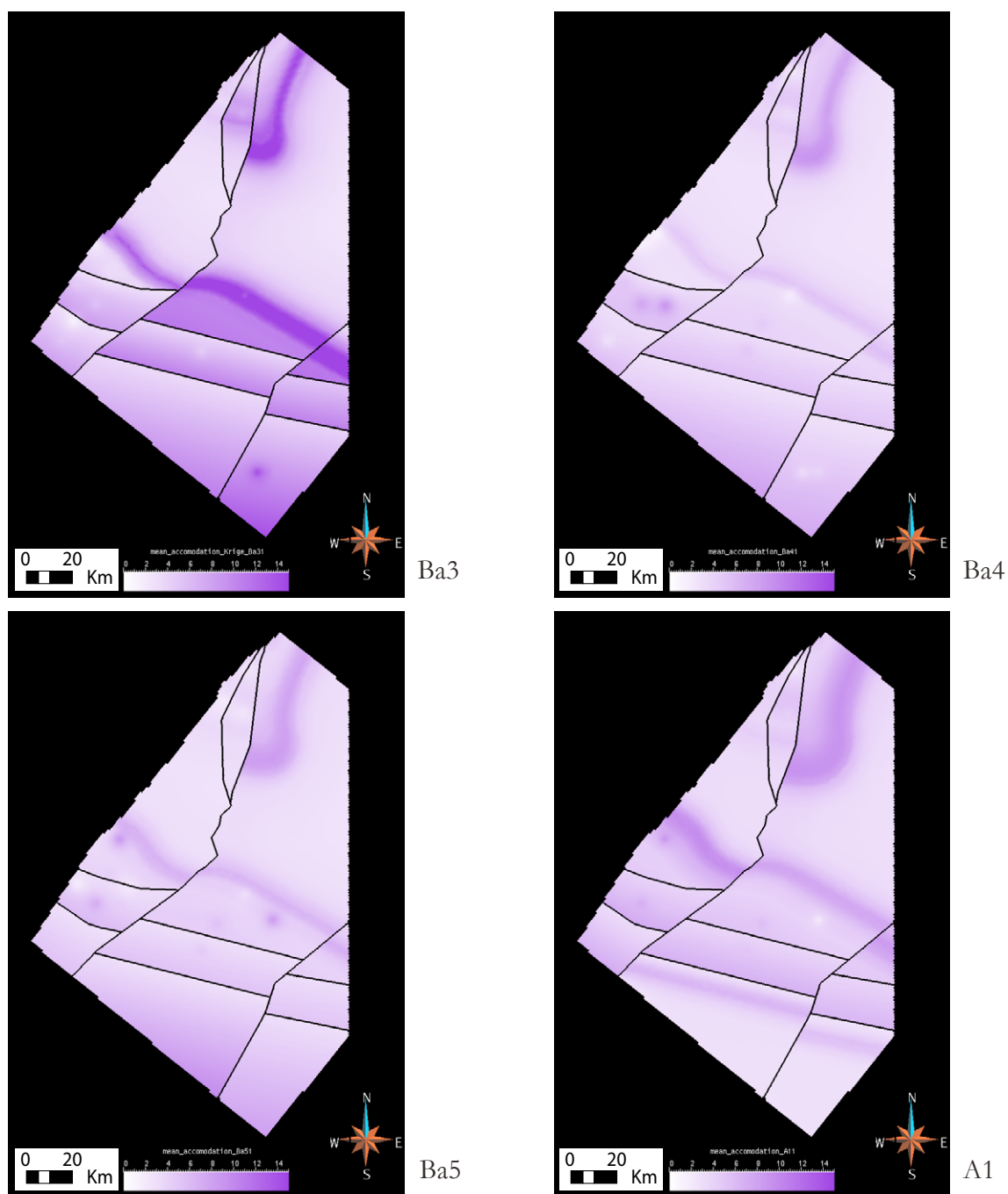


Figure 5-9 : Grille de moyenne d'accommodation, par layer, des quatre séquences. L'échelle des valeurs s'étend de 0 à 15 mètres. Les valeurs les plus importantes ont les couleurs les plus foncées.

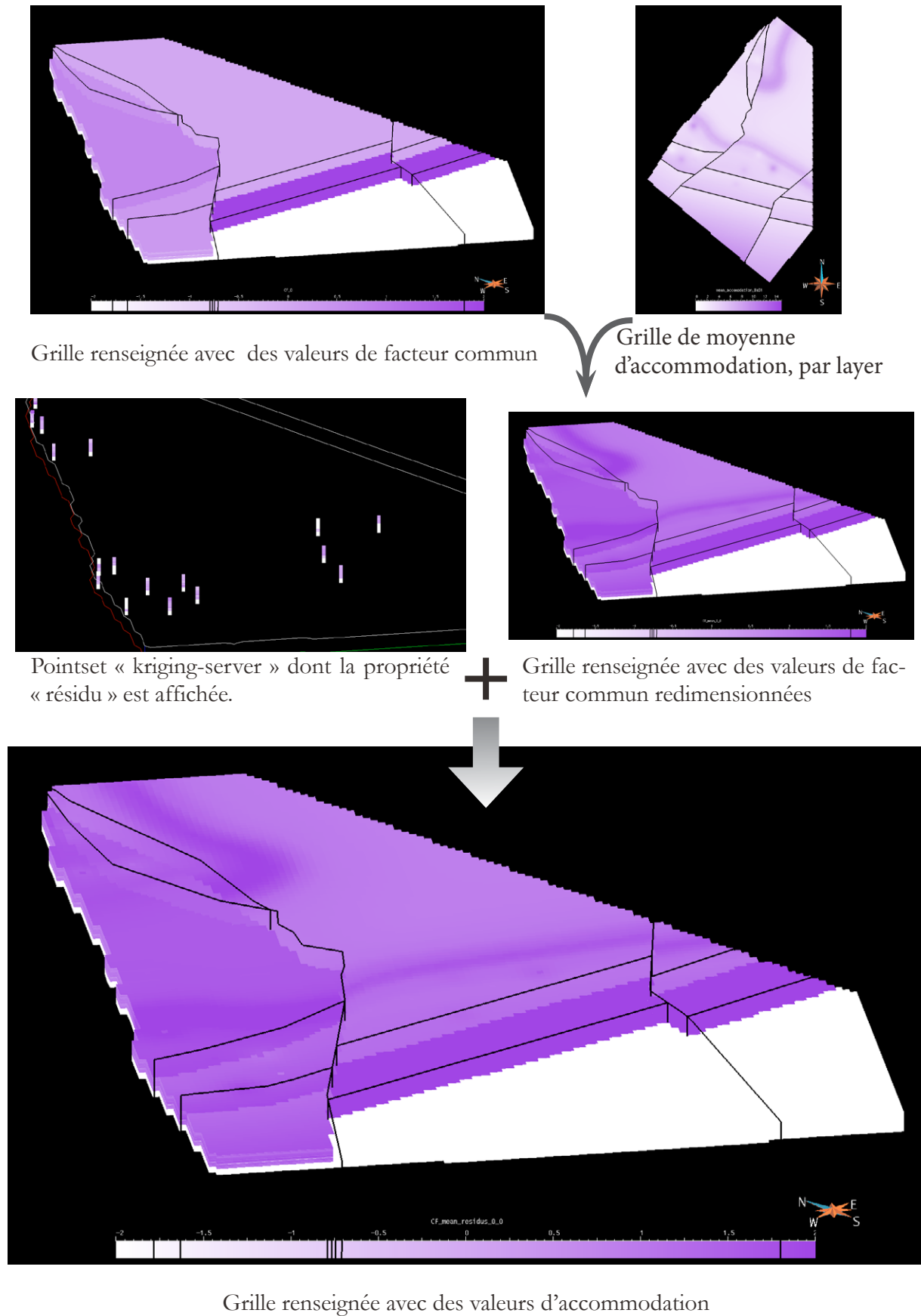


Figure 5-10 : Illustration des étapes permettant la présence d'une valeur d'accommodation dans la majorité des cellules de la grille.

#### 2.2.4 DE L'ACCOMMODATION À LA PALÉOPROFONDEUR D'EAU

L'accommodation, qui correspond à l'espace disponible à la sédimentation, est simplifiée comme étant le résultat d'une variation de paléoprofondeur d'eau additionnée à une épaisseur de sédiment déposé dans un intervalle de temps donné cf. Formule 5-1, p. 169. Malgré l'observation de nombreux stylolites dans certains secteurs (Gorges du Nan par exemple), le coefficient de compaction a été jugé constant et indépendant du faciès, le rendant négligeable. Pour chaque cellule, la valeur de l'épaisseur de sédiment déposé a donc été estimée égale à sa hauteur. En intégrant en une seule couche numérique des valeurs de paléoprofondeur d'eau, il devient alors possible d'obtenir à partir des valeurs d'accommodation une valeur de paléoprofondeur d'eau .

Afin de contraindre au mieux la paléoprofondeur d'eau dans chaque cellule, plusieurs cartes de paléoprofondeur d'eau ont été intégrées : une à la base de la séquence Ba3, donc à la base du modèle, une dans la première couche des cortèges transgressifs de chaque séquence, une dans la dernière couche du cortège transgressif, c'est-à-dire au niveau de la surface d'inondation maximum, et une dans la dernière couche de chaque séquence, soit au niveau de chaque limite de séquence. Ces cartes ont été dessinées avec la même méthode que celle avec laquelle les cartes d'épaisseurs ont été créées, à partir des cartes de paléoprofondeur d'eau argumentées dans le paragraphe 8.3 du chapitre 4, p. 163. Les valeurs de paléoprofondeur d'eau attribuées aux puits dans les couches considérées ont été rassemblées dans des objets « pointsets ». Ces valeurs ont ensuite servi de données dures pendant l'extrapolation des valeurs de paléoprofondeur d'eau entre les courbes d'iso-valeur. En revanche, contrairement aux cartes d'épaisseurs, les valeurs de chaque carte de paléoprofondeur d'eau ont été attribuées à une seule propriété de l'objet « Voxet », sans différenciation de bloc. En effet, il a été jugé préférable de dessiner des cartes de paléoprofondeur d'eau les plus réalistes possibles, avec des transitions de valeurs progressives d'un bloc à un autre, sans effet de « marche d'escalier ». Les cartes de paléoprofondeur d'eau sont visibles Figure 5-11, p. 189.

Un outil disponible dans le module gOstrat permettant de recalculer les valeurs d'accommodation entre chaque couple de carte a ensuite été utilisé. Cette étape permet également d'attribuer des valeurs d'accommodation aux cellules qui n'en possédaient jusqu'alors aucune. Dans les cortèges sédimentaires où il n'y avait aucune donnée et où la distribution des couches numériques a été définie comme proportionnelle, les mêmes valeurs d'accommodation sont attribuées sur l'ensemble des couches de chaque cortège.

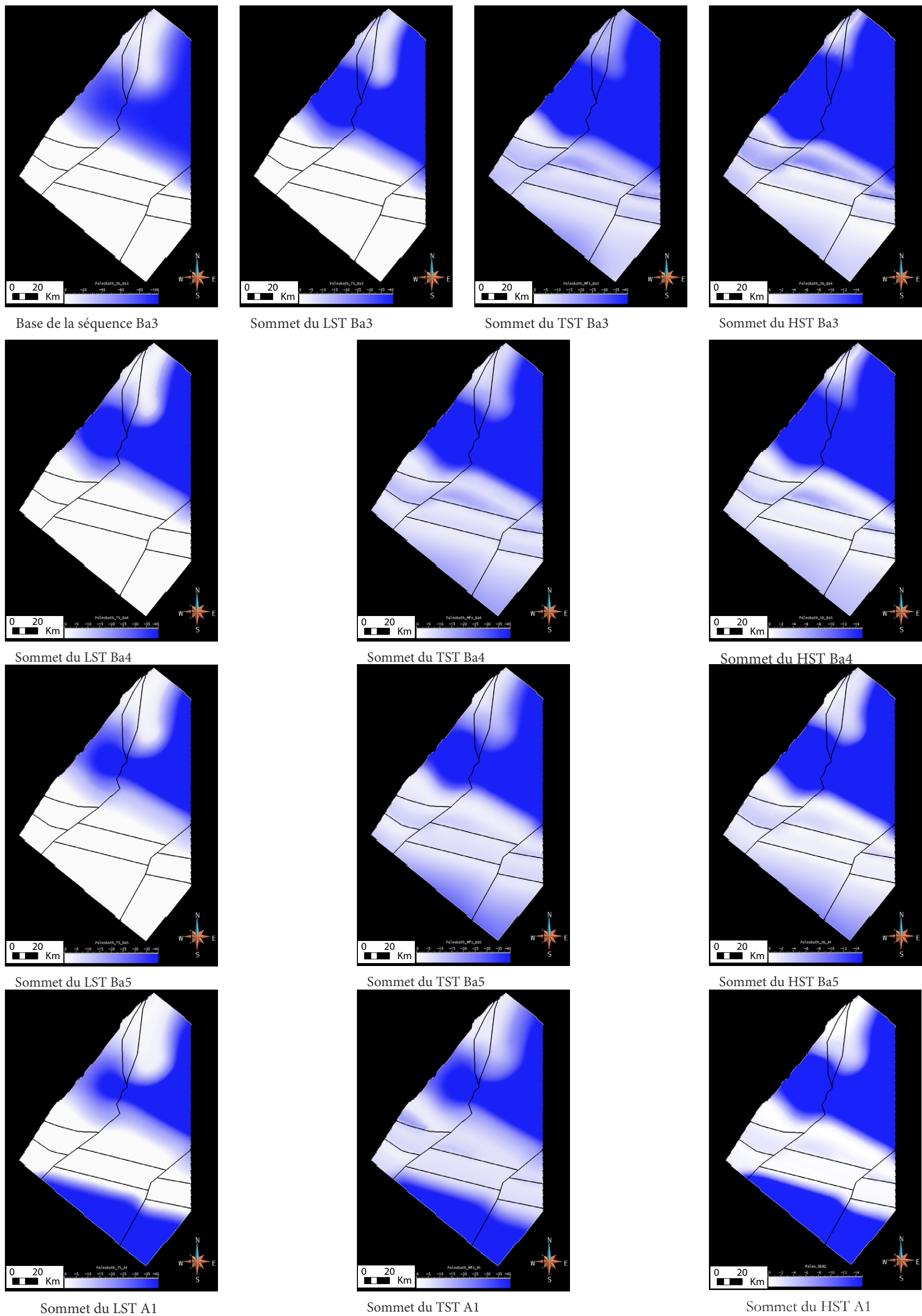


Figure 5-11 : Cartes de paléoprosfondeur d'eau à différentes périodes. L'échelle va de 0 mètre, représenté par la couleur blanche à -40 mètres représenté par le bleu le plus foncé.

En chaque cellule de la grille une valeur d'accommodation cohérente avec les cartes de paléoprofondeur d'eau est alors renseignée. A partir de ces valeurs et d'une carte de paléoprofondeur d'eau de référence (une de celles utilisées pour le recalcul de l'accommodation), il est alors possible de calculer une valeur de paléoprofondeur d'eau dans chaque cellule.

#### 2.2.5 DE LA PALÉOPROFONDEUR D'EAU AU FACIÈS

Le modèle intégrant l'ensemble du Sud-Est de la France, des valeurs de paléoprofondeur d'eau plus importantes que celles rencontrées sur la plateforme ont été attribuées au niveau du centre du bassin Vocontien. Il a donc été nécessaire de rajouter au modèle d'association de faciès une nouvelle valeur permettant de les simuler. La distribution de cette nouvelle association de faciès numéroté 0 a été défini avec une moyenne de -60 mètres, un écart-type de 13 mètres et une valeur maximale de -45 mètres. La distribution de l'ensemble des faciès est visible Figure 5-12, p. 191.

Seule, la valeur de paléoprofondeur d'eau contenue dans chaque cellule de la grille ne permet pas la simulation des valeurs d'association de faciès. Il faut qu'au préalable la probabilité d'apparition de chaque faciès y soit renseignée. Cette variable à 7 dimensions (7 Associations de faciès) est appelée « cube de proportion ». Ce cube de proportion est calculé à partir de la valeur de paléoprofondeur d'eau contenue dans la cellule considérée et d'une matrice d'occurrence. Cette matrice représente la fonction qui relie les proportions des associations de faciès en fonction de la paléoprofondeur d'eau. Elle est obtenue par la combinaison du fichier de distribution des associations de faciès en fonction de la paléoprofondeur d'eau et d'un fichier poids exprimant la probabilité globale de chaque Association de faciès. Ce fichier poids est obtenu grâce à un outil disponible dans le module gOstrat qui calcule la proportion totale de chaque faciès sur l'ensemble des puits. Il a été question de créer un fichier poids par séquence (un pour chaque grille de 100 couches). Mais, du fait de la progradation de la plateforme, l'échantillonnage n'aurait pas été représentatif des mêmes cortèges sédimentaires d'une séquence à une autre. Le fichier poids de la séquence Ba3 aurait été le seul incluant des associations de faciès rencontrées dans le cortège de bas niveau. L'apparition des faciès granulaires, particulièrement présents dans ces cortèges, aurait donc été favorisée dans cette séquence. Afin que les simulations soient homogènes dans les différentes grilles, un seul fichier poids a été créé et utilisé. Il est basé sur la proportion de présence des associations de faciès sur l'ensemble des puits, jugée comme représentative de leurs proportions sur l'ensemble du modèle.



AF	Moyenne	Écart-type	Limite inférieur	Limite supérieur
AF6	0	1,5	-3	2
AF5	-3	1,5	-6	0
AF4	-6,5	2	-10,5	-2,5
AF3	-7	3,5	-14	-1
AF2	-17,5	4	-25,5	-8
AF1	-35	8	-50	-19
AF0	-50	8	Non défini	-45

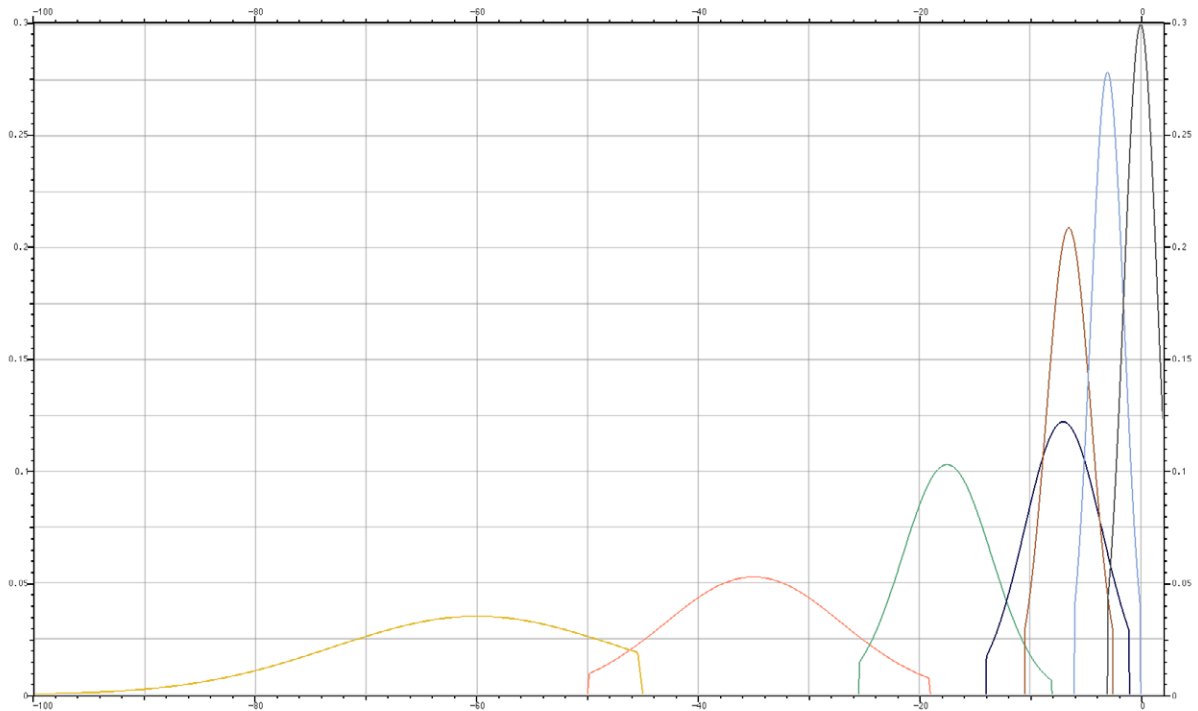


Figure 5-12 : Distribution des associations de faciès en fonction de la paléoprofondeur d'eau. La courbe grise représente la distribution de l'association de faciès 6 (AF6), la bleue de l'AF5, la marron de l'AF4, la noire de l'AF3, la verte de l'AF2, la orange de l'AF1 et la jaune de l'AF0. Le tableau ci-dessus décrit les paramètres renseignés pour la création des distributions.

Une fois les cubes de proportions calculés, une valeur d'association de faciès peut être simulée dans chaque cellule de la grille. Un variogramme doit être créé afin de caractériser l'influence de la valeur d'une cellule sur la valeur des cellules environnantes. Plusieurs variogrammes gaussiens ont été testés afin de choisir celui permettant de représenter de la manière la plus réaliste possible la répartition des associations de faciès. La direction de la bordure de plateforme étant variable sur la surface du modèle aucun azimuth n'a été renseigné. La valeur des portées horizontales testées est toujours inférieure à celle de la portée du variogramme utilisé pour extrapoler les valeurs de moyenne d'accommodation aux puits. En effet, aux abords des points de donnée, la variabilité des associations de faciès, autrement dit, des environnements de dépôt,

est plus importante que celle des valeurs d'épaisseur ou de moyenne d'accommodation aux puits qui représentent des phénomènes d'une échelle spatiale plus grande. Des variogrammes avec des portées horizontales de 1500, 3000, 4000 et 5000 mètres et une portée verticale d'un mètre ont été créés pour réaliser quatre simulations à partir du même cube de proportion et avec un même germe (seed) de 101. Elles ont été réalisées dans la grille de la séquence Ba5. Les résultats de ces simulations sont présentées Figure 5-13, p. 193. La dimension des cellules étant de 1500x1500 mètres, le variogramme d'une portée de 1500 mètres ne permet pas aux cellules de s'influencer les unes les autres. La répartition des faciès se fait alors de manière éparse ce qui ne représente pas la réalité. En revanche, les variogrammes dont les portées sont de 3000, 4000 et 5000 ont permis une simulation des associations de faciès avec une répartition en agglomérats d'autant plus importante que la portée est grande. Le résultat de la simulation réalisée avec une portée de 4000 mètres a été jugé comme la plus représentative des répartitions des environnements de dépôts. C'est donc cette portée qui a été choisie pour la simulation finale des associations de faciès dans l'ensemble des modèles.

Les simulations se faisant dans la grille chronostratigraphique qui ne représente pas l'épaisseur réelle des cortèges, la portée verticale du variogramme a été surestimée afin de corréliser les couches les unes aux autres.

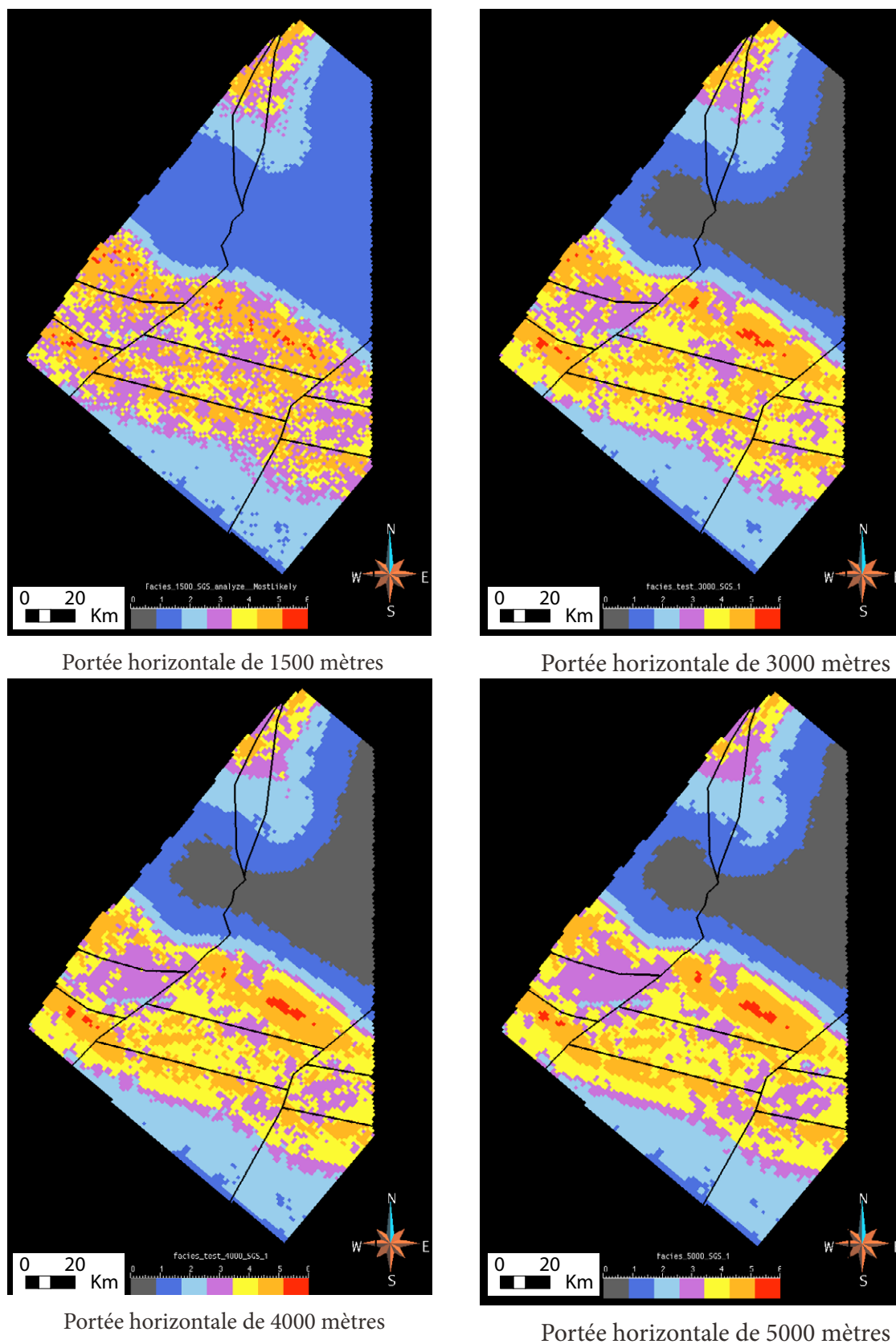


Figure 5-13 : Résultats des quatre simulations réalisées avec des variogrammes de portées horizontales différentes. La portée verticale est de 1 mètre, le cube de proportion et le germe utilisé sont les mêmes pour l'ensemble des simulations. Pour la légende des associations de faciès, se référer à la Figure 5-8, p. 183. La couche affichée est la couche numéro 50 de la grille de la séquence Ba5.

Les simulations des associations de faciès de chaque séquence ont été réalisés à partir du germe 101, avec un variogramme gaussien d'une portée horizontale de 4000 mètres et d'une portée verticale de trois mètres, sans azimuth défini. Les modèles en environnements de dépôts obtenus sont visibles Figure 5-14, p. 194, Figure 5-15, p. 194, Figure 5-16, p. 195 et Figure 5-17, p. 195.

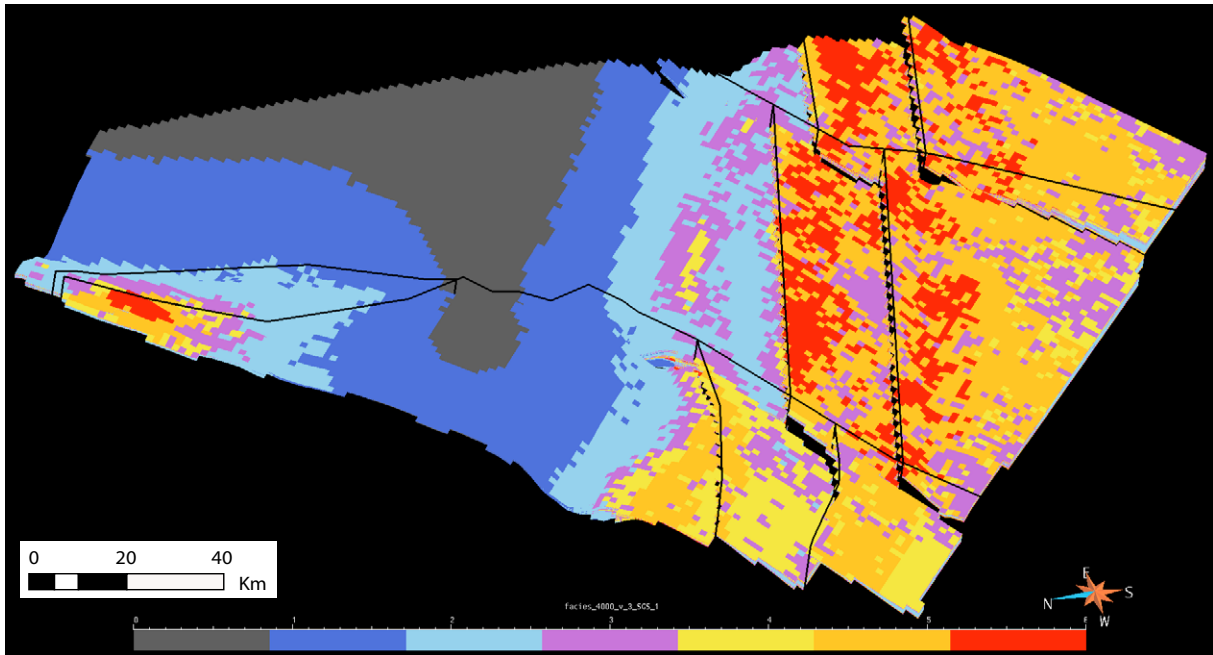


Figure 5-14 : Modèle structural en associations de faciès de la séquence de dépôt Ba3. Pour la légende, se référer à la Figure 5-8, p. 183. L'exagération verticale est de facteur 15.

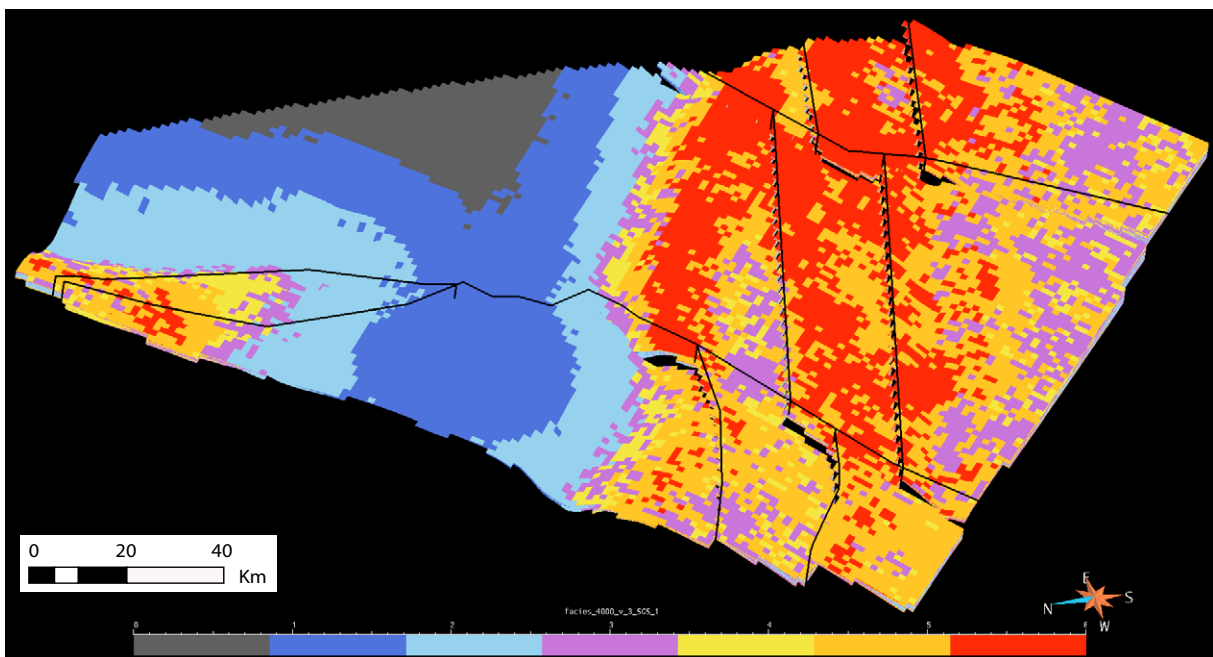


Figure 5-15 : Modèle structural en associations de faciès de la séquence de dépôt Ba4. Pour la légende, se référer à la Figure 5-8, p. 183. L'exagération verticale est de facteur 15.

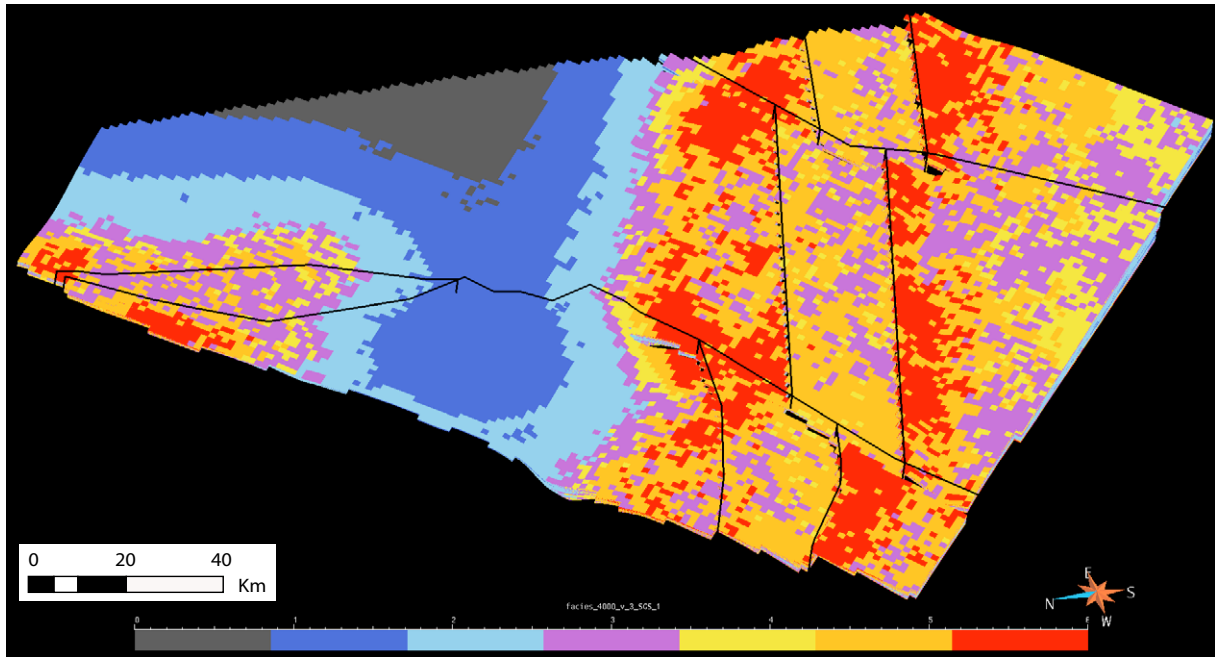


Figure 5-16 : Modèle structural en associations de faciès de la séquence de dépôt Ba5. Pour la légende, se référer à la Figure 5-8, p. 183. L'exagération verticale est de facteur 15.

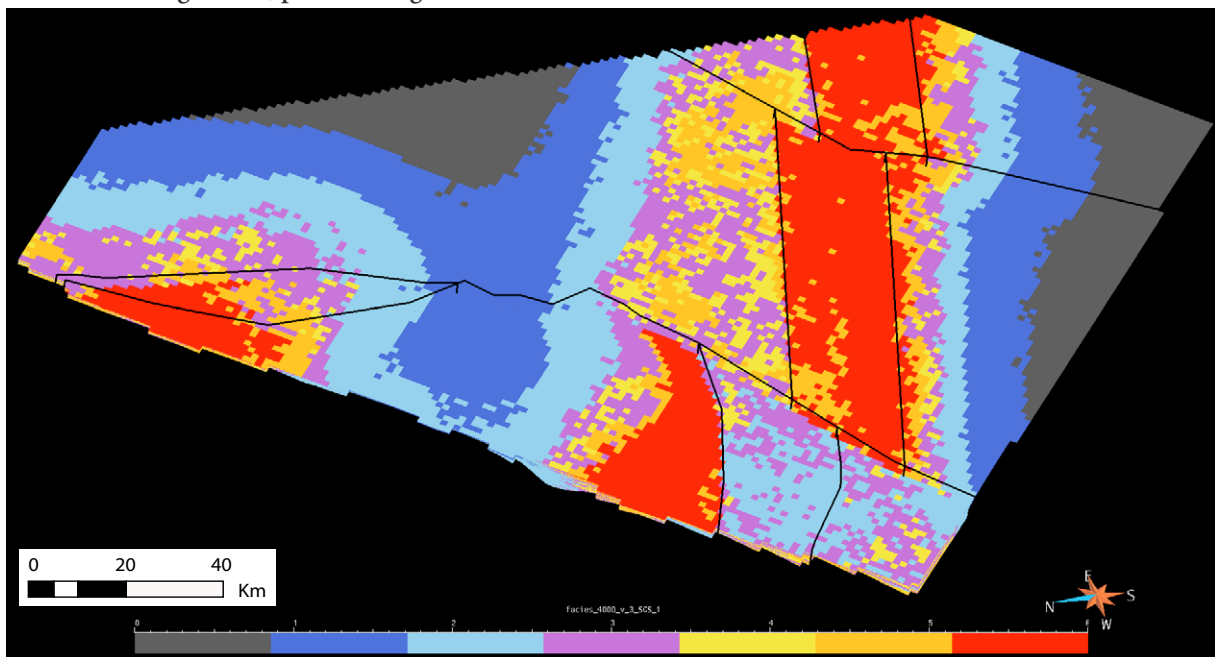


Figure 5-17 : Modèle structural en associations de faciès de la séquence de dépôt A1. Pour la légende, se référer à la Figure 5-8, p. 183. L'exagération verticale est de facteur 15.

#### 2.2.6 APPLICATION DE L'ÉROSION

Les modèles ainsi obtenus représentent la géométrie de la série urgonienne avant érosion.

Afin de modéliser l'effet de l'érosion, un outil présent dans le module gOstrat permet de réduire jusqu'à zéro l'épaisseur de certaines cellules. Dans les grilles structurales, une propriété « épaisseur de cellule » a été créée à partir de la différence d'altitude entre le sommet et la base de

chaque couche dans chaque cellule. Cette propriété a ensuite été transférée dans la grille chronostratigraphique correspondante.

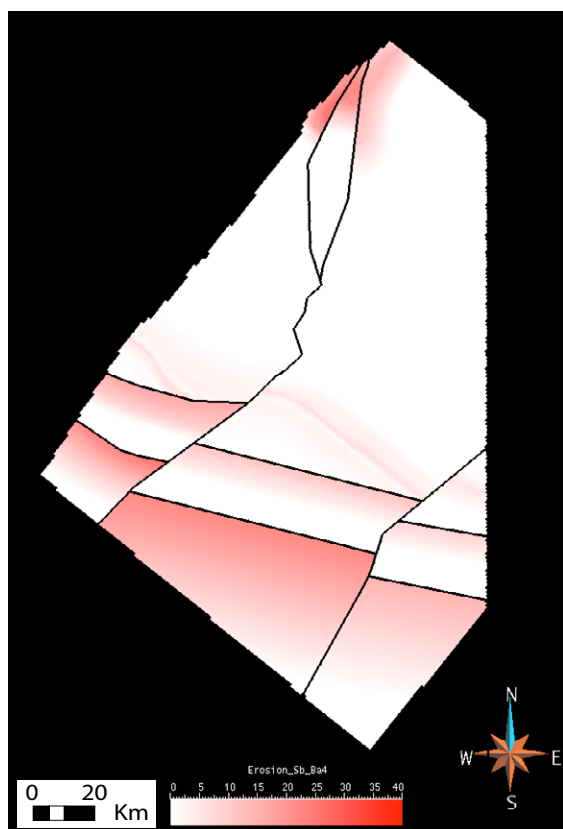
Avec la même méthode que celle utilisée pour la création des cartes d'épaisseurs d'Urgonien, quatre cartes d'épaisseur d'Urgonien érodé ont été créées à partir des cartes justifiées dans le paragraphe 8.2 du chapitre 4, p. 162. Une carte a été créée pour chaque limite de séquence, surface à partir de laquelle l'érosion a affecté la série Urgonienne. Afin de rester cohérent avec la géométrie initiale de la grille, tout comme pour les cartes d'épaisseurs, une propriété par carte et par bloc a été créée dans l'objet « voxet » dans lequel l'interpolation entre les courbes d'iso-épaisseur érodée a été réalisée. Cela afin que les valeurs d'épaisseur d'un bloc n'influencent pas les valeurs d'épaisseurs des autres blocs. Les valeurs d'épaisseurs érodées aux puits ont servi de données dures pour l'interpolation des valeurs d'épaisseur érodées, elles y sont donc respectées.

Depuis ce voxet, les valeurs d'épaisseur érodées ont été transférées bloc par bloc dans une grille identique à la grille chronostratigraphique mais qui ne possède qu'une seule couche numérique : la « grille 2D » (cf. Figure 5-18, p. 197). Un premier outil du module gOstrat permet de soustraire aux valeurs contenues dans la propriété « épaisseur de cellule » de la grille chronostratigraphique, la valeur d'épaisseurs érodées contenue dans la grille 2D. Cette soustraction se fait dans autant de cellules que nécessaire situées sous la couche définie comme couche de référence. Dans les quatre grilles représentant une séquence stratigraphique, la couche de référence est la couche sommitale qui correspond à la limite de la séquence supérieure. Dans la grille englobant l'ensemble des séquences, la couche de référence renseignée est différente pour chaque carte et correspond aux limites de séquences supérieures de chaque séquence. La Figure 5-19, p. 198 montre un exemple de modification de la propriété « épaisseur de cellule ».

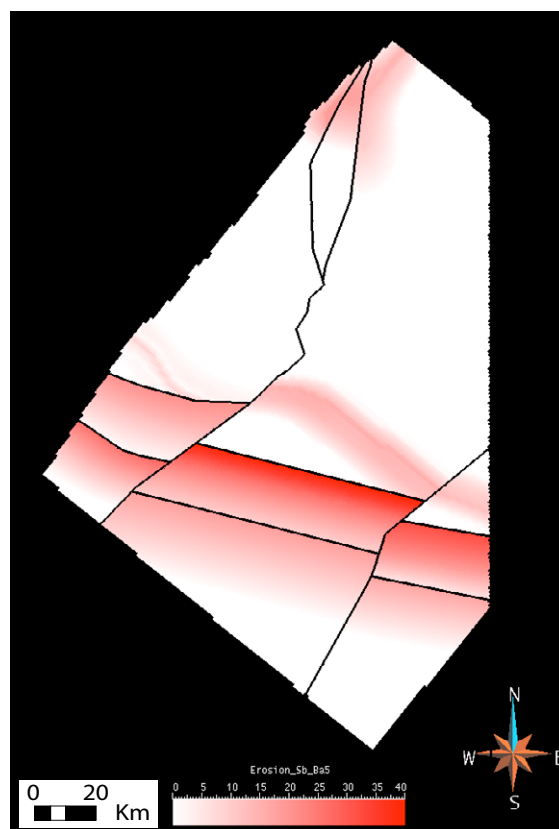
Une fois la propriété « épaisseur de cellule » recalculée en prenant en compte les cartes d'épaisseurs érodées, elles ont été transférées de nouveau dans les grilles structurales. Les quatre grilles des séquences Ba3, Ba4, Ba5 et A1 ont alors été réunies en une seule et même grille de 400 couches numériques (cf. figure...).

Un deuxième outil disponible dans le module gOstrat permet alors d'attribuer à chaque cellule de la grille l'épaisseur dont la valeur est contenue dans la propriété « épaisseur de cellule » (cf. figure...). Malheureusement, la géométrie des cellules aux abords des failles est mal gérée par cet outil. Elles ont donc été éliminées.

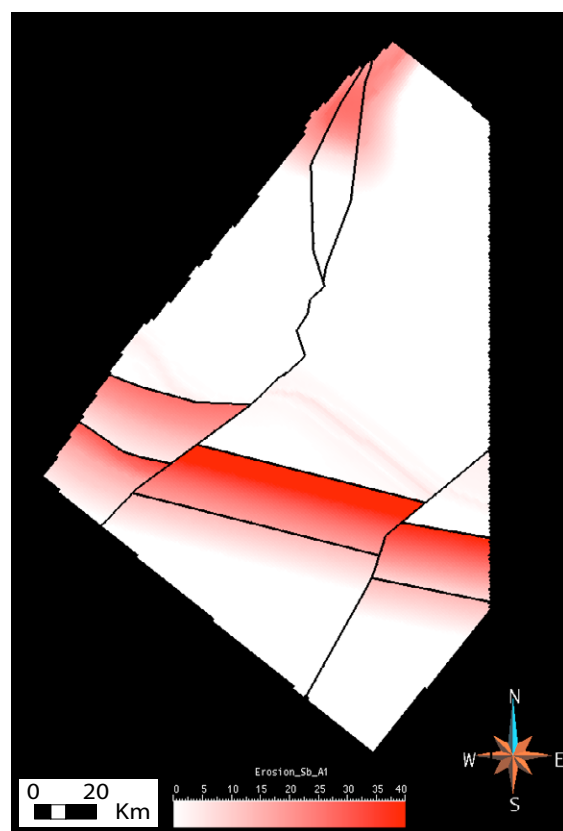




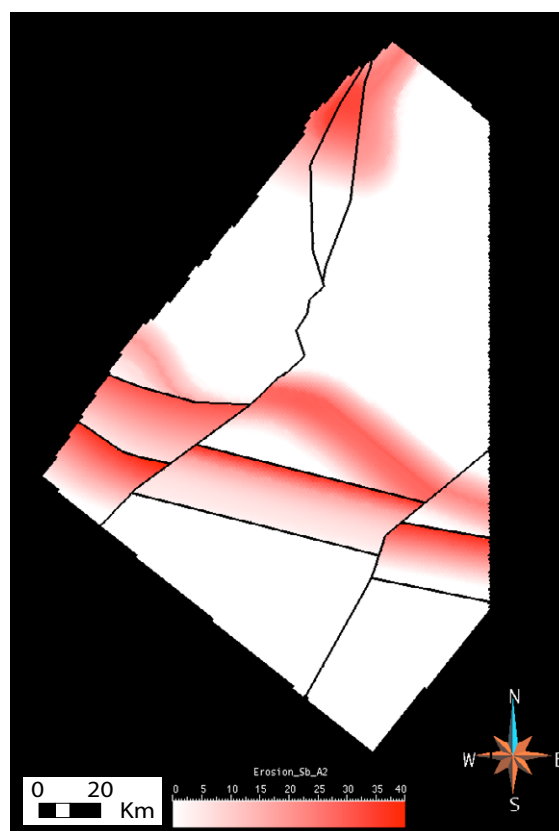
SbBa4



SbBa5



SbA1



SbA2

Figure 5-18 : Cartes des épaisseurs érodées sous les quatre limites de séquences. Les valeurs des épaisseurs vont de la couleur la plus claire à la plus foncée de 0 mètre à 40 mètres.

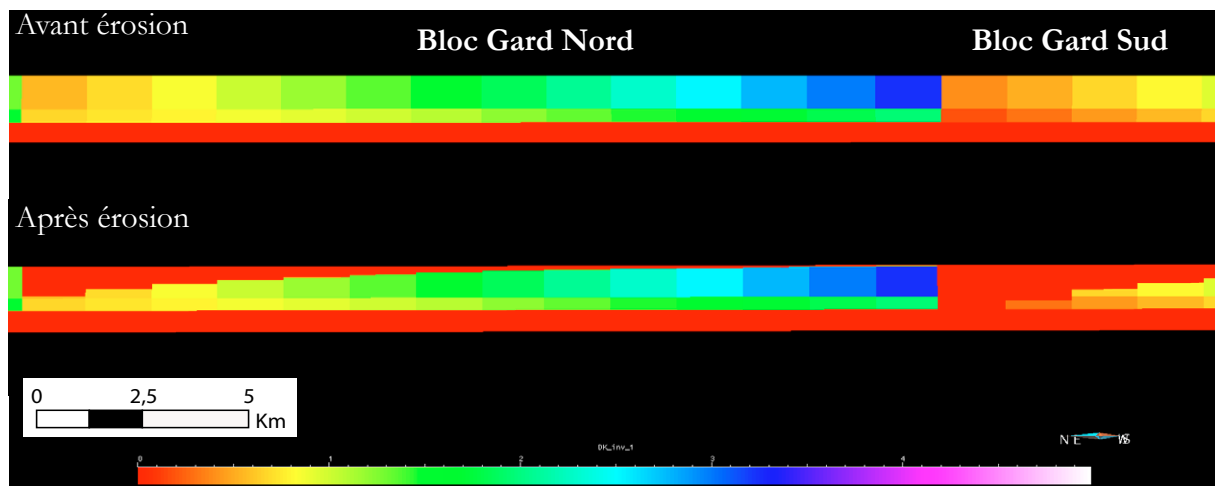


Figure 5-19 : Exemple de l'effet de l'érosion sur l'épaisseur des cellules. Les deux images représentent la grille chronostratigraphique de la séquence Ba5 vue depuis l'ouest-nord-ouest. Elles sont centrées sur le bloc nord et la partie nord du bloc sud du Gard. L'échelle de couleur correspond à la variable «épaisseur de cellule». Les valeurs les plus faibles : 0 mètre, sont représentées en rouge, les valeurs les plus importantes : 5 mètres, en blanc. L'image du haut correspond aux valeurs d'épaisseurs de cellule avant érosion, celle du bas, après érosion.

Cette étape permet de redonner à la série urgonienne son épaisseur actuelle (cf. Figure 5-20, p. 199), mais aussi de modifier sa géométrie interne (cf. chapitre 1, paragraphe 3.1.2, p. 208)

De plus, elle permet d'éliminer les valeurs d'association de faciès attribuées dans ces cellules. Le modèle final renseigné en environnement de dépôt est visible Figure 5-21, p. 200.

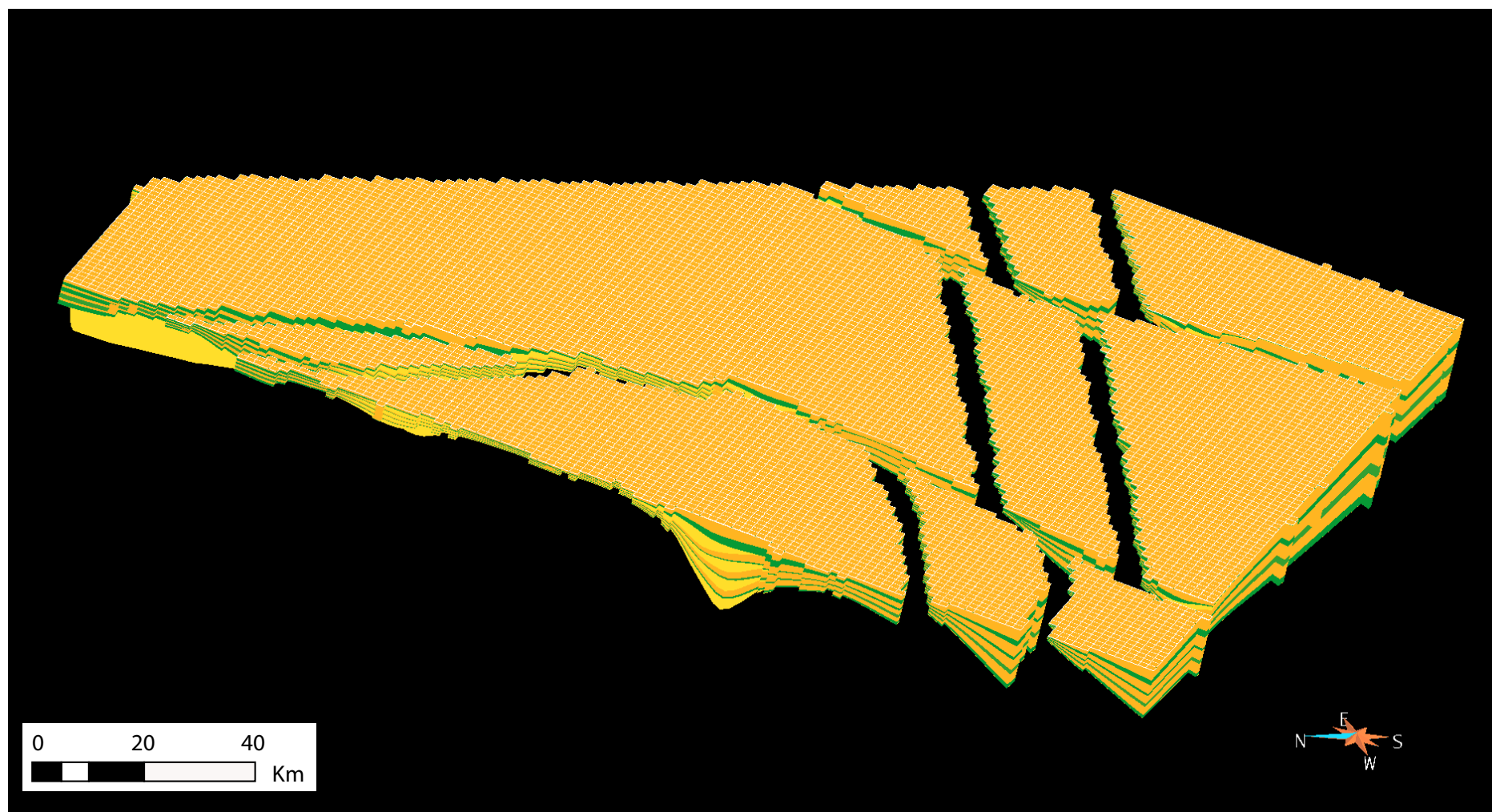


Figure 5-20 : Grille structurale après érosion de la série urgonienne créée en assemblant les quatre grilles représentant les quatre séquences. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent aux cortèges de bas niveau, celles coloriées en vert au cortèges transgressifs et celles coloriées en orange aux cortèges de haut niveau. L'exagération verticale est de facteur 15.

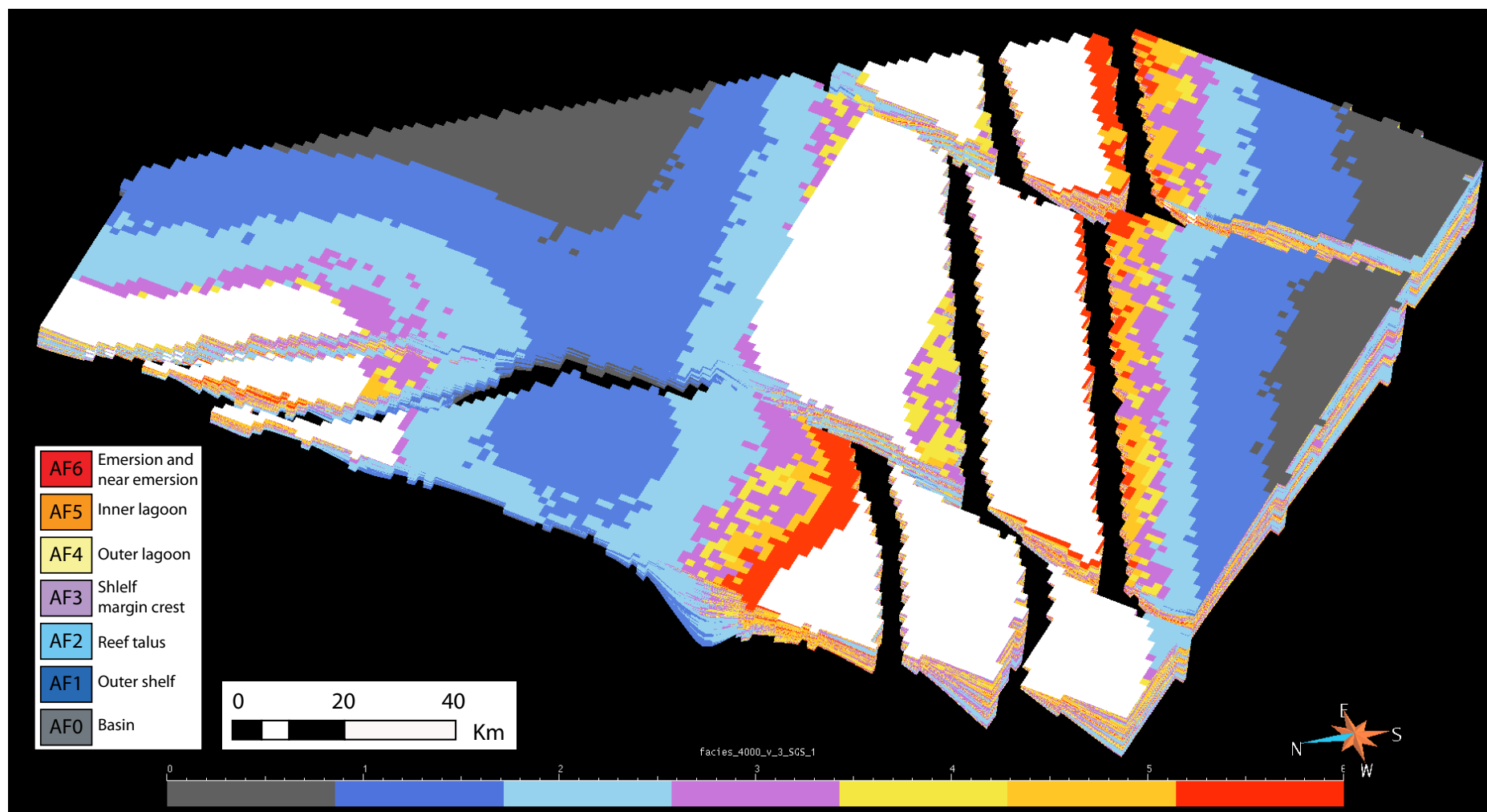


Figure 5-21 : Modèle structural et stratigraphique renseigné en environnement de dépôt. Les cellules blanches correspondent aux cellules dont l'épaisseur a été réduite à zéro lors de la modélisation de l'érosion.

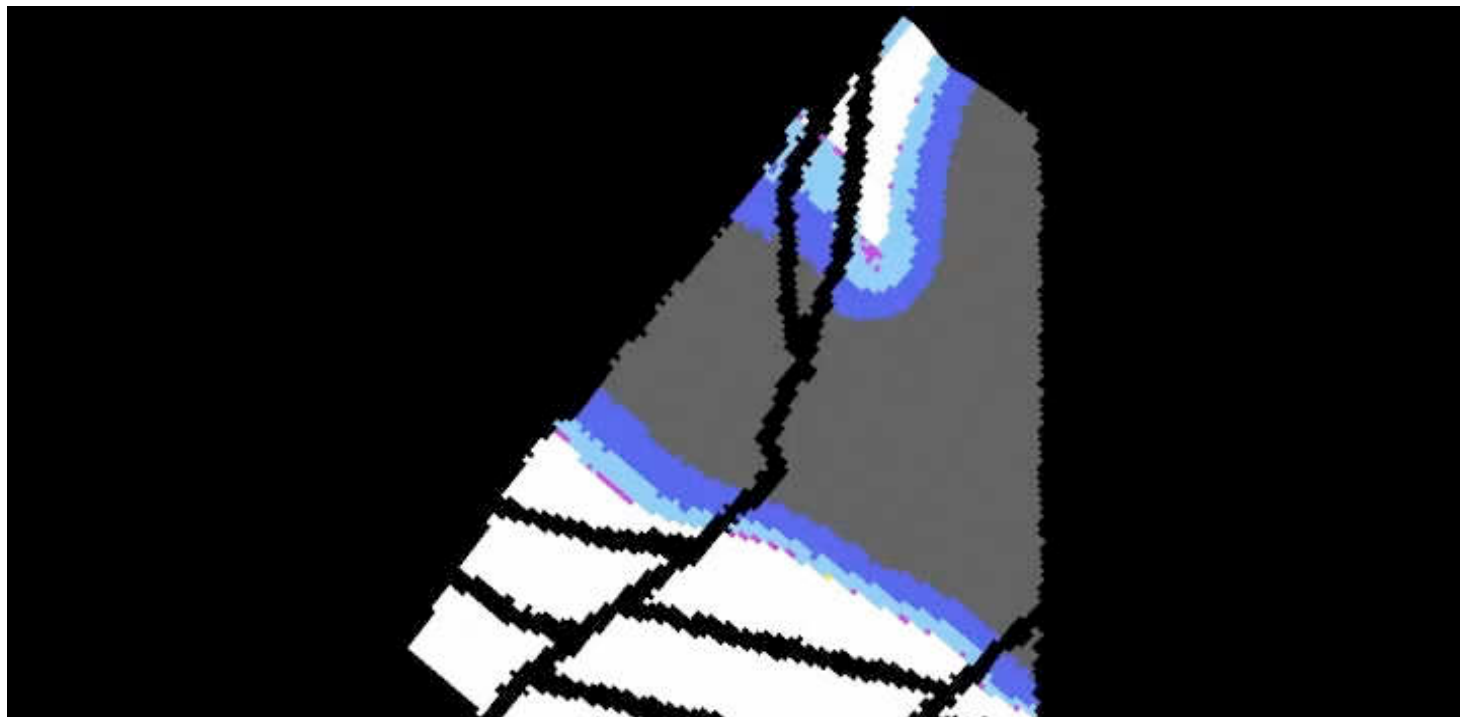


Figure 5-22 : Vidéo du modèle stratigraphique érodé renseigné en environnement de dépôt. Les images correspondent aux différentes couches numériques qui défilent dans l'ordre stratigraphique depuis la base de la séquence Ba3 jusqu'au sommet de la séquence A1. Les cellules blanches correspondent aux cellules dont l'épaisseur est égale à zéro (non dépôt ou érosion).

### 3 DISCUSSION

Dans ce paragraphe, plusieurs sections du modèle sont exposées afin de présenter la géométrie de la série Urgonien ainsi que la répartition des environnements de dépôts. Le tracé de ces différentes coupes sont représentés sur la Figure 5-23, p. 202.

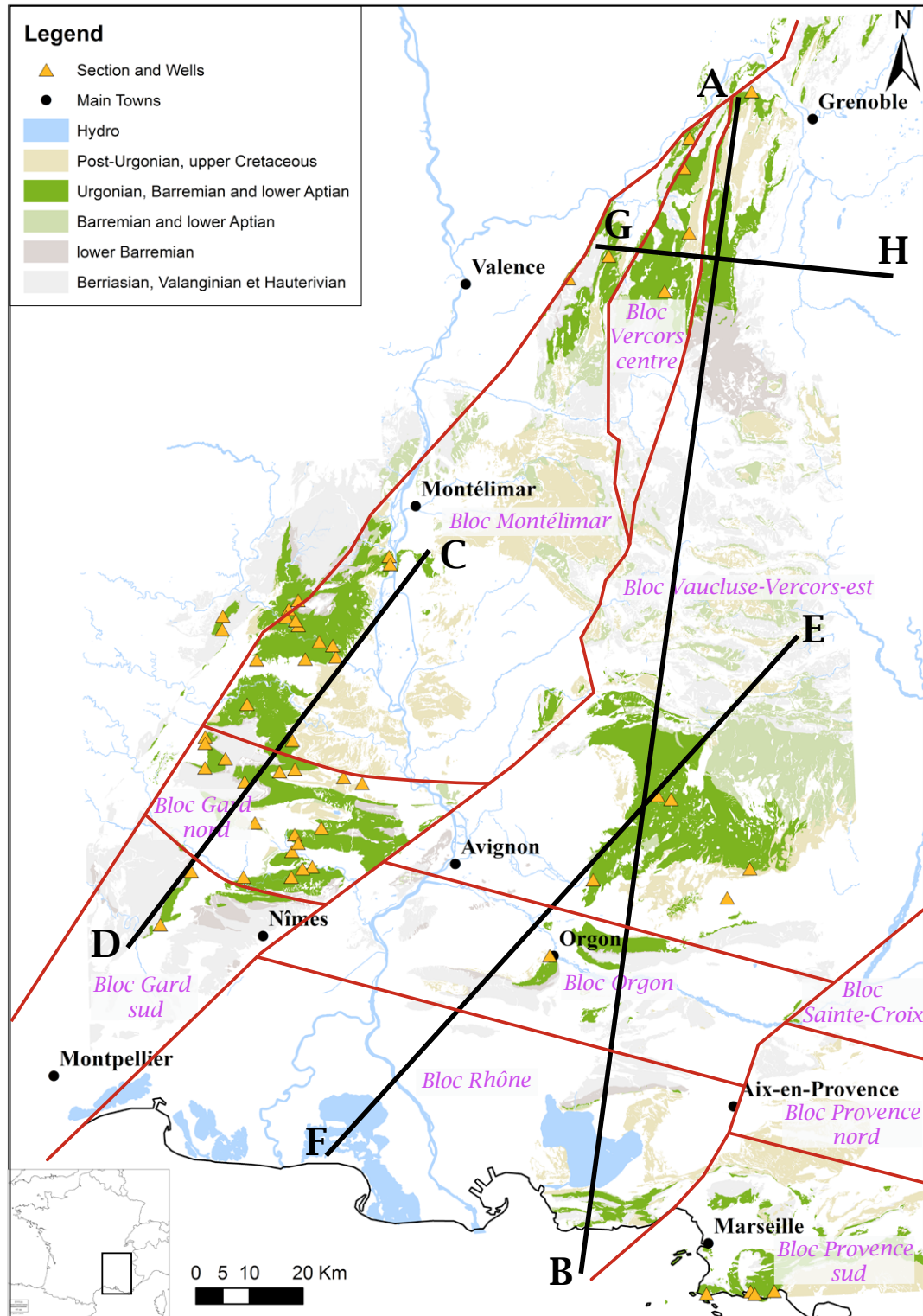


Figure 5-23 : Carte du Sud-Est de la France sur laquelle sont représentés en noir les tracés des différentes coupes présentées de la Figure 5-24, p. 204 à la Figure 5-34, p. 215.



### **3.1 GÉOMÉTRIE DE LA SÉRIE URGONIENNE**

#### **3.1.1 ORGANISATION SÉQUENTIELLE**

La géométrie des cortèges stratigraphiques de la grille finale est principalement dépendante des cartes d'épaisseurs utilisées pour la création des surfaces stratigraphiques. Elles ont permis la création de dépôts en éventail dans les blocs basculés, et de clinoformes sur la bordure de plateforme. Elles ont également permis de représenter la progradation de ces clinoformes, particulièrement importante entre les séquences Ba3 et Ba4 ainsi qu'entre les séquences Ba5 et A1 (cf. Figure 5-24, p. 204).

Comme le montrent les coupes des différents secteurs, un Urgonien très différent en terme de géométrie et de séquences stratigraphiques a été modélisé en fonction des secteurs.

Dans les blocs du Gard, nord et sud, d'Orgon, de Provence nord, dans la partie la plus au sud des blocs de Montélimar, Vaucluse-Vercors-est et de Sainte-Croix, dans la partie septentrionale des blocs Montélimar et Vercors centre, ainsi que dans la partie nord-ouest du bloc Vaucluse-Vercors-est, l'Urgonien ne se compose que de cortèges transgressifs et régressifs. De par leur position sur la plateforme, les cortèges de haut niveau y sont plus puissants que les cortèges transgressifs (cf. Figure 5-25, p. 205).

L'organisation est identique dans les blocs Rhône et Provence sud en ce qui concerne les séquences du Barrémien terminal, période pendant laquelle la subsidence va être de plus en plus importante pour finalement permettre l'ouverture du bassin de la Bédoule à l'Aptien basal. La répartition et la géométrie des séquences est alors tout à fait différente avec la présence du cortège de bas niveau de la séquence A1 (cf. Figure 5-26, p. 206).

Au contraire, au niveau de la bordure de plateforme sur le pourtour du bassin Vocontien, ce sont les cortèges de bas niveau qui sont les principaux responsables de la puissance de l'Urgonien (cf. Figure 5-25, p. 205, Figure 5-26, p. 206 et Figure 5-27, p. 207)

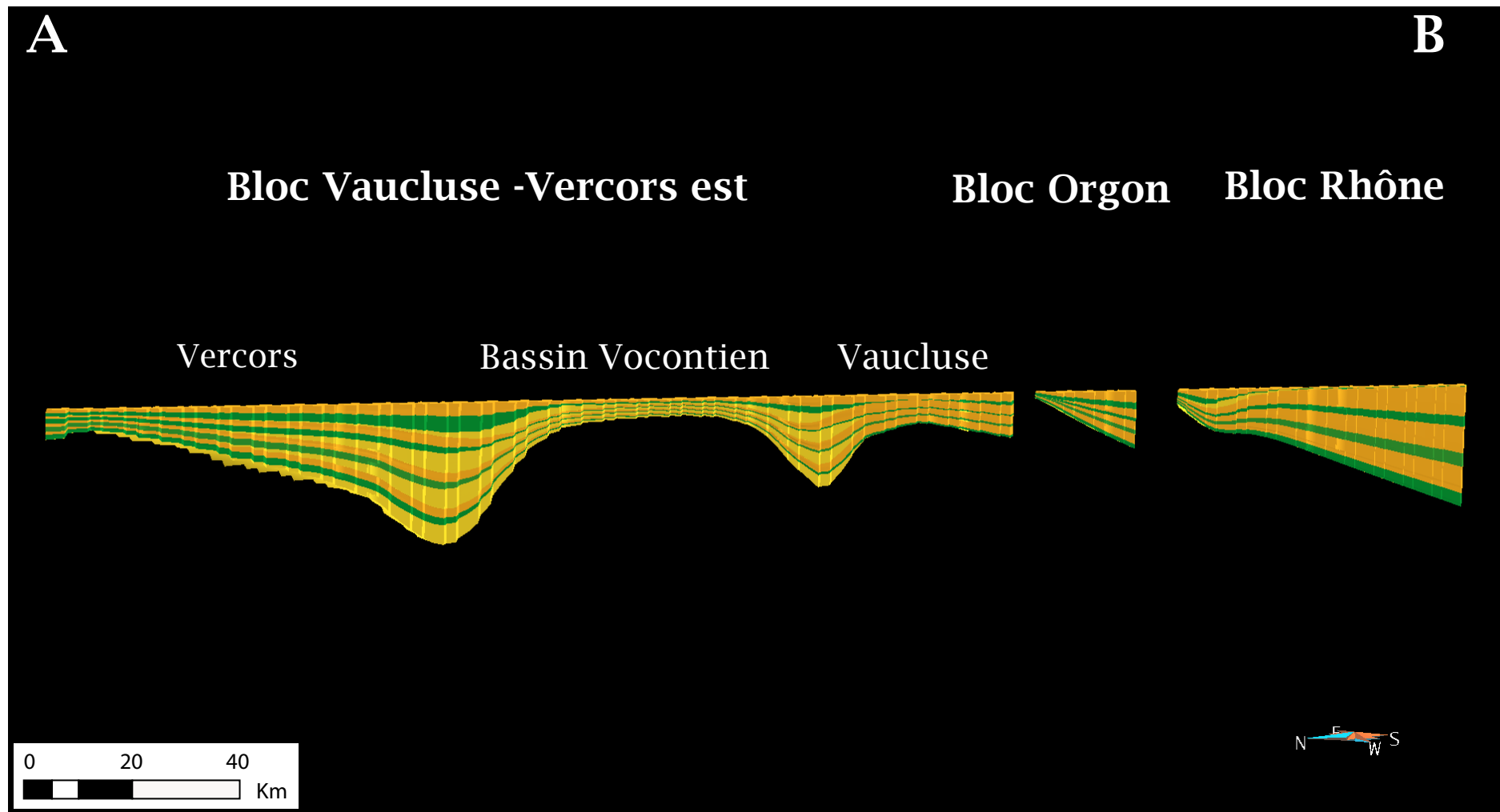


Figure 5-24 : Coupe nord-sud du modèle stratigraphique après érosion, du bloc Vercors est au bloc Rhône. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent aux cortèges de bas niveau, celles coloriées en vert au cortèges transgressifs et celles coloriées en orange aux cortèges de haut niveau. L'exagération verticale est de facteur 15.

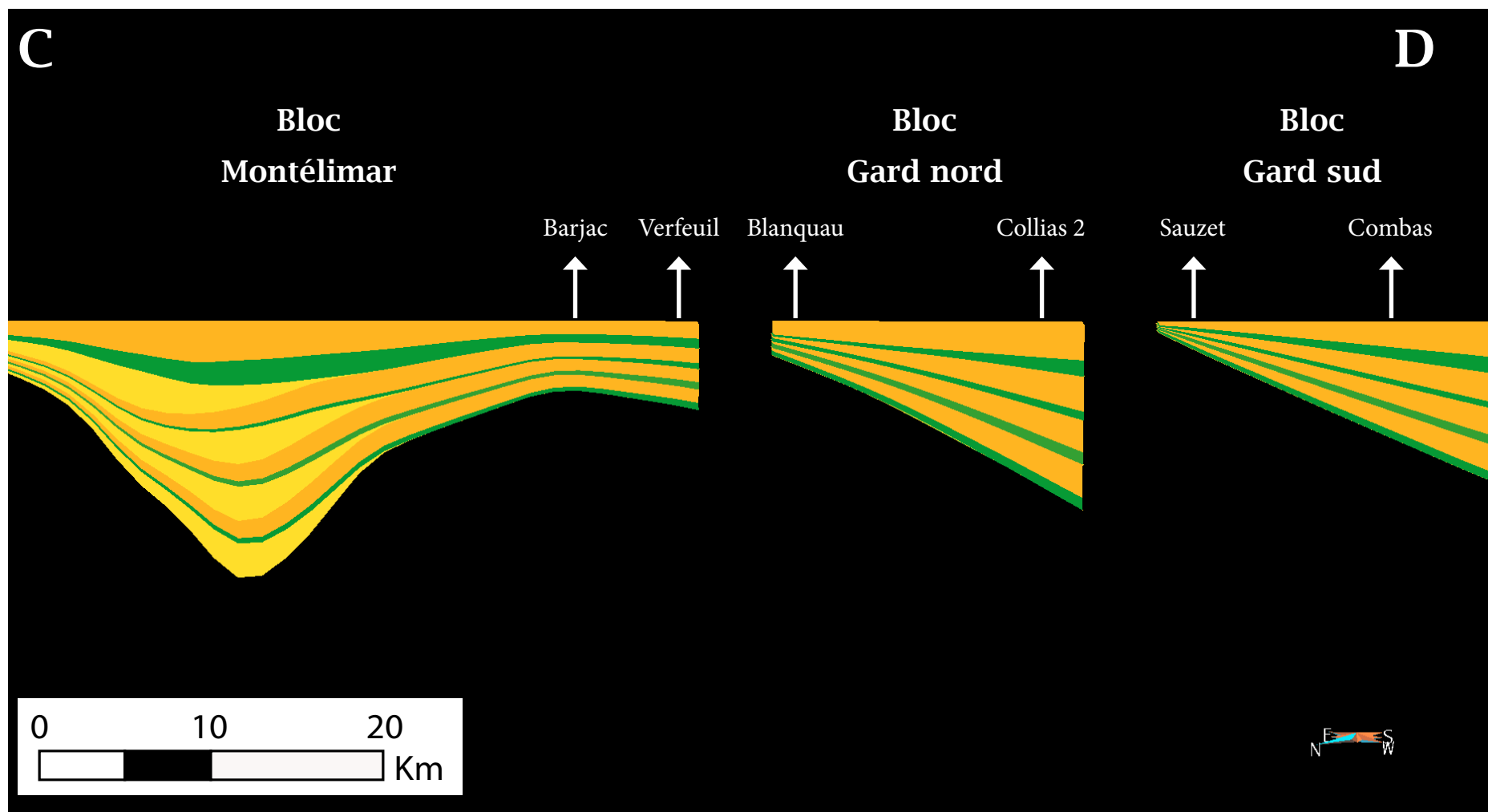


Figure 5-25 : Coupe nord nord-est à travers les blocs du Gard et le sud du bloc Montélimar. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent aux cortèges de bas niveau, celles coloriées en vert au cortèges transgressifs et celles coloriées en orange aux cortèges de haut niveau. L'exagération verticale est de facteur 15.

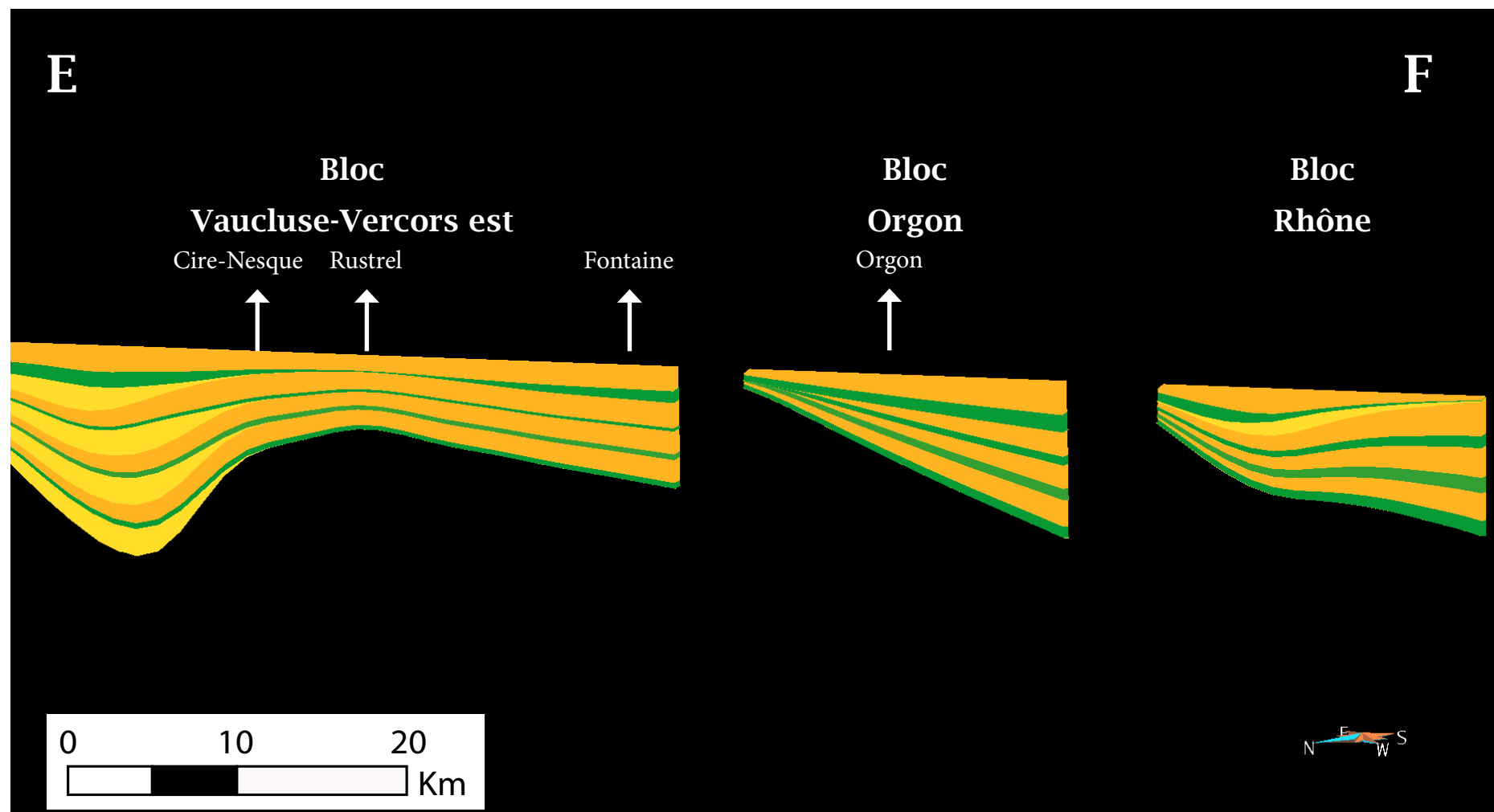


Figure 5-26 : Coupe nord-sud à travers les blocs Rhône, Orgon et le sud du bloc Vacluse - Vercors est. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent aux cortèges de bas niveau, celles coloriées en vert au cortèges transgressifs et celles coloriées en orange aux cortèges de haut niveau. L'exagération verticale est de facteur 15.

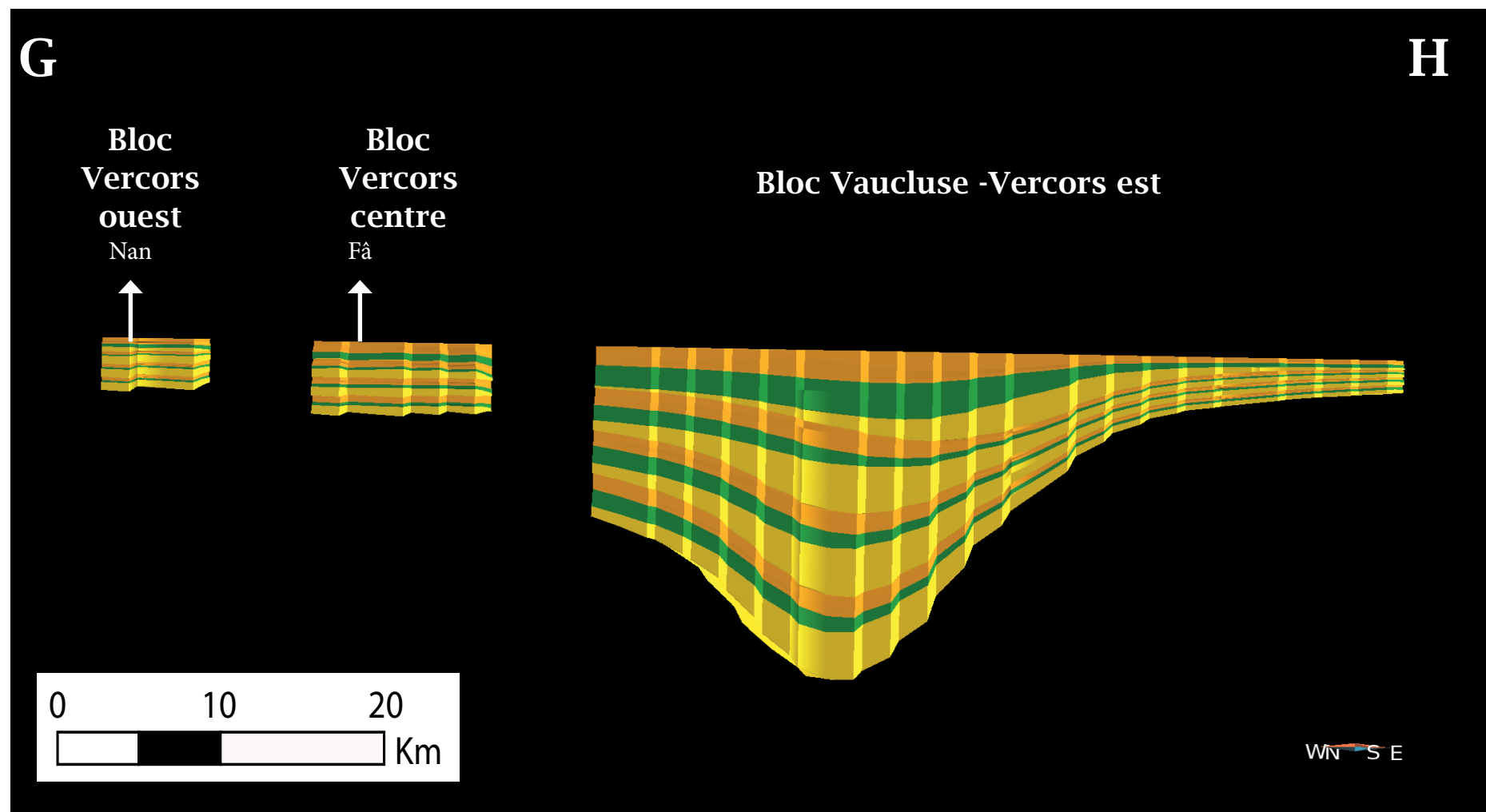


Figure 5-27 : Coupe est-ouest du modèle stratigraphique à travers le bloc est du Vercors. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent aux cortèges de bas niveau, celles coloriées en vert au cortèges transgressifs et celles coloriées en orange aux cortèges de haut niveau. L'exagération verticale est de facteur 15.

### 3.1.2 GÉOMÉTRIE INTERNE

Grâce aux options choisies lors de la construction de la grille structurale (cf. 2.1.5, p. 178), et à l'aplanissement de certaines cellules lors de l'érosion de la grille, des géométries internes complexes ont pu être modélisées.

Dans les cortèges transgressifs et régressifs, l'option « proportionnelle » qui avait été sélectionnée à propos de la distribution des couches numériques, a permis la modélisation d'une géométrie de dépôt en éventail. De plus, l'aplanissement de certaines cellules pendant la modélisation des effets d'érosion permet l'observation de terminaisons en toplap dans les cortèges de haut niveau. Les valeurs des épaisseurs érodées étant de plus en plus importantes de la base au sommet de la série urgonienne progradante, de plus en plus de terminaisons en toplap apparaissent (cf. Figure 5-28, p. 209).

L'option « parallèle au sommet » sélectionnée pour la distribution des couches dans les cortèges de bas niveau et dans le cortège transgressif de la séquence A1 a permis la modélisation de terminaisons en downlap (cf. Figure 5-28, p. 209 et Figure 5-29, p. 209).

A travers les cartes d'épaisseurs, les cartes d'épaisseurs érodées et la distribution des couches numériques, leur géométrie a pu être contrôlée de telle sorte qu'elle mime la géométrie des cortèges sédimentaires et des paraséquences qui les composent.



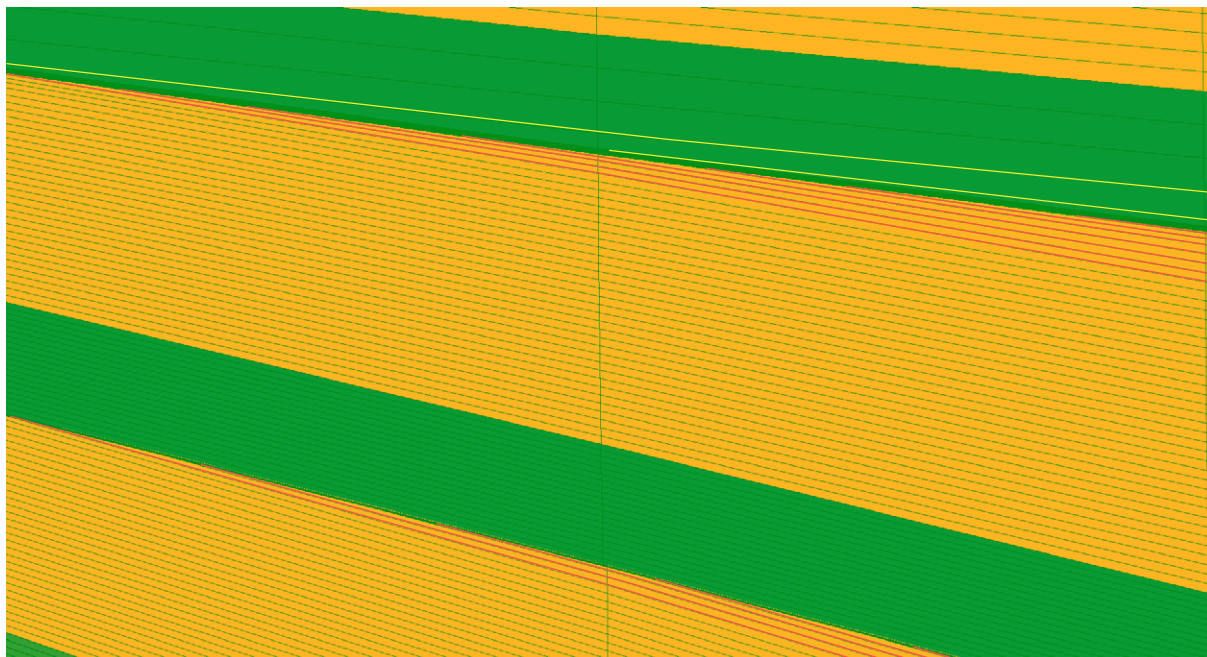


Figure 5-28 : Zoom sur le bloc nord du Gard, vue depuis l'ouest-nord-ouest. L'image est centrée sur la séquence Ba5. Les couches numériques vertes représentent les cortèges transgressifs, les orange les cortèges de haut niveau. Les limites de couches aux sommets des séquences Ba4 et Ba5 ont été dessinées en rouge afin de souligner les terminaisons en toplap. Dans le TST A1, où l'option « parallèle au sommet » avait été choisie pour la distribution des couches numériques, certaines limites ont été dessinées en jaune afin de souligner les terminaisons en downlap.

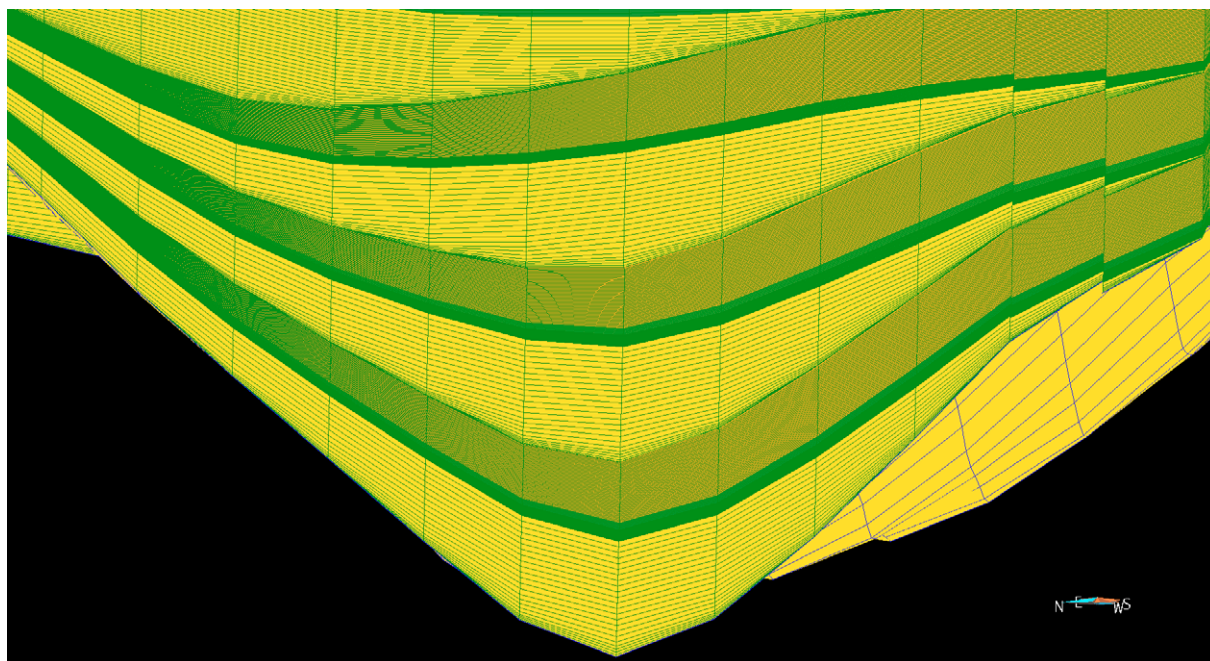


Figure 5-29 : Zoom sur la grille structurale après érosion au niveau du passage plateforme-bassin, au nord de l'Ardèche, vue depuis l'ouest-nord-ouest. Les couches numériques coloriées en jaune appartiennent aux cortèges de bas niveau, celles coloriées en vert aux cortèges transgressifs et celles coloriées en orange aux cortèges de haut niveau. Les lignes vertes représentent les limites de couche. L'exagération verticale est de facteur 15. Sur cette image, les terminaisons en downlap dans les cortèges de bas niveau sont particulièrement visibles.

### 3.2 DISTRIBUTION DES FACIÈS

La méthodologie gOstrat a permis d'obtenir un modèle structural et stratigraphique renseigné en environnements de dépôt des plus réalistes (cf. Figure 5-22, p. 201).

A l'échelle du modèle, une tendance générale à l'attribution d'association de faciès correspondant à des environnements de dépôt de plus en plus interne depuis le bassin vers l'intérieur de la plateforme est observée. En revanche, à l'échelle d'un bloc, la tendance inverse est constatée. Les valeurs des associations des faciès les plus internes ont été attribuées aux cellules situées en tête de bloc et les plus externes en pied de bloc. Cette évolution est aussi observée au sud des blocs Montélimar, Vaucluse-Vercors-est et de Saite-Croix. Elle est ici due à la subsidence induite par les failles normales délimitant ces blocs au sud. Dans le Vercors, le même phénomène est visible le long de la faille de l'Isère (cf. Figure 5-30, p. 210, Figure 5-31, p. 211 et ).

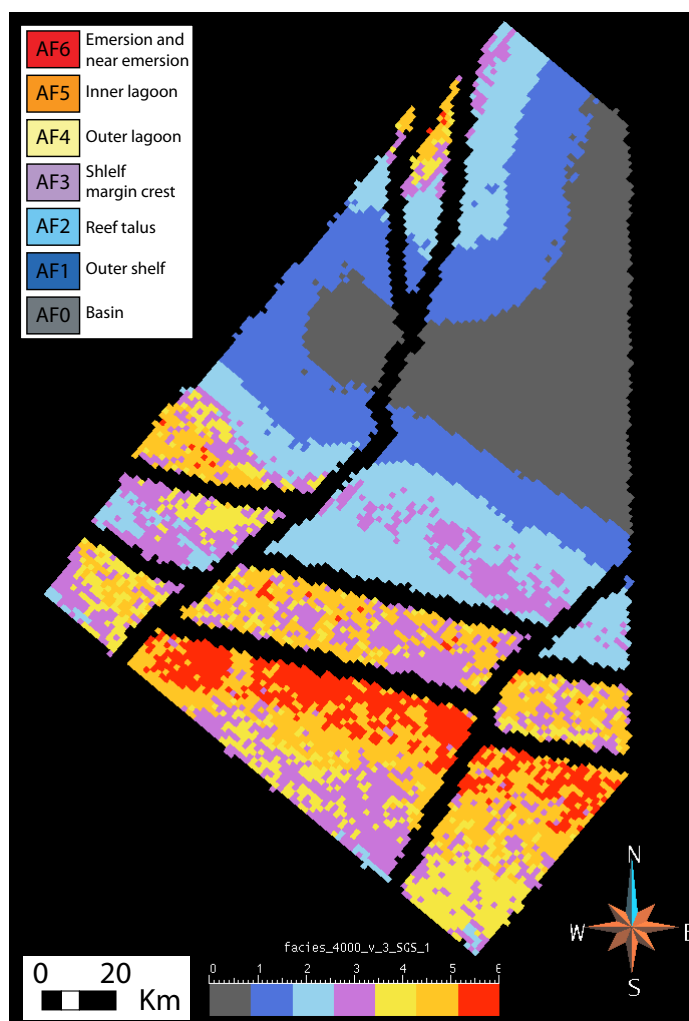


Figure 5-30 : Image de la couche numérique 174 illustrant la répartition des environnements de dépôt dans les différents blocs.

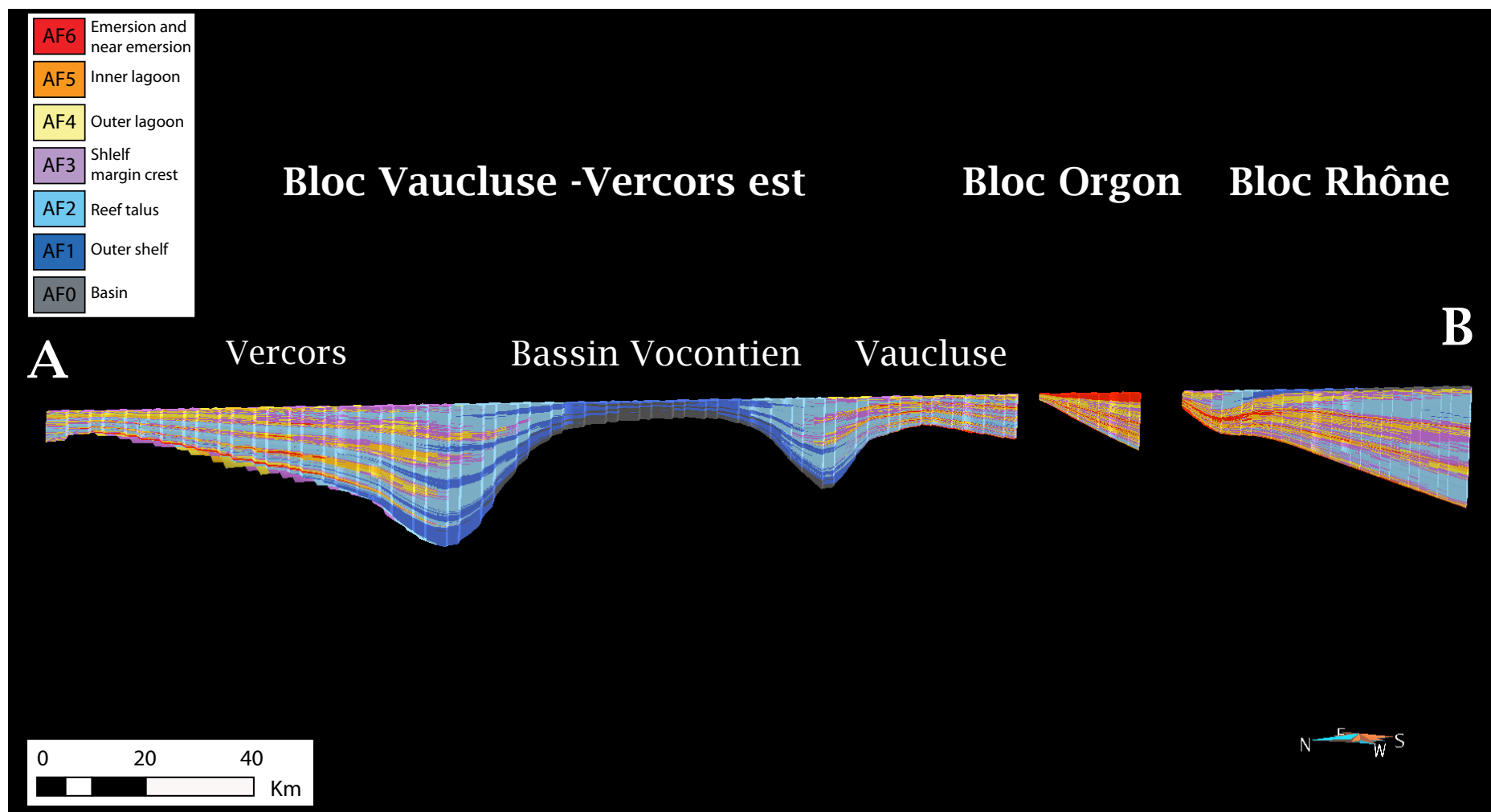


Figure 5-31 : Coupe nord-sud du modèle stratigraphique après érosion, renseigné en environnements de dépôt, du bloc Vercors est, au nord, au bloc Rhône, au sud. L'exagération verticale est de facteur 15.

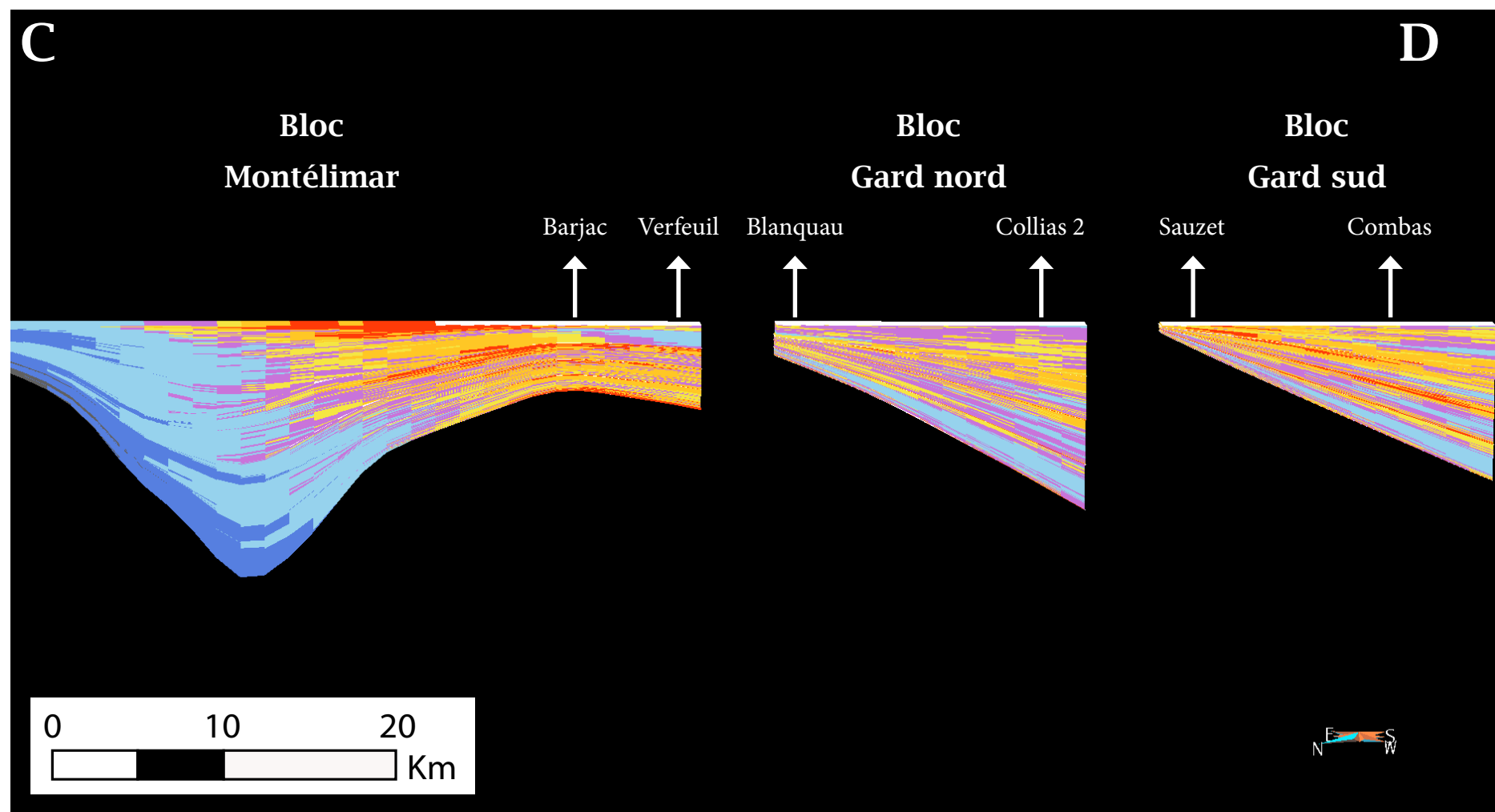


Figure 5-32 : Coupe nord-nord-est du modèle stratigraphique renseigné en environnements de dépôt, à travers les blocs du Gard et le sud du bloc Montélimar. L'exagération verticale est de facteur 15.

Cette direction de distalité secondaire est de plus en plus importante dans les blocs Rhône et Provence sud à partir de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba4 jusqu'à la limite de séquence A1. Dans la séquence A1, un nouveau bassin est ouvert dans la partie sud-sud-est du modèle : le bassin de la Bédoule. La répartition des environnements de dépôt devient alors très différente. Dans une même couche, on observe, du nord-nord-ouest au sud-sud-est, le passage d'environnement de plateforme interne à celui de bassin (cf. Figure 5-22, p. 201 et Figure 5-33, p. 214).

Des associations de faciès correspondant aux faciès granulaires (AF3 et AF2) ont principalement été attribuées aux cellules des cortèges de bas niveau (cf. Figure 5-22, p. 201 et Figure 5-34, p. 215). Sur le terrain, ce sont en effet ces faciès qui dominent dans le cirque d'Archiane (Vercors) par exemple, ou encore en amont de la rivière Ardèche, où le cortège de bas niveau de la séquence Ba3 a été échantillonné à la base de la coupe de Serrou (cf. chapitre, 4, paragraphe 2, p. 120).

Hormis dans les blocs Rhône et Provence nord où la tendance est inversée à partir de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba4, les associations de faciès représentent des environnements de dépôt de plus en plus internes depuis la séquence Ba3 jusqu'à la séquence A1. Ceci est dû à la progradation générale de la plateforme urgonienne (cf. Figure 5-31, p. 211 et Figure 5-33, p. 214).

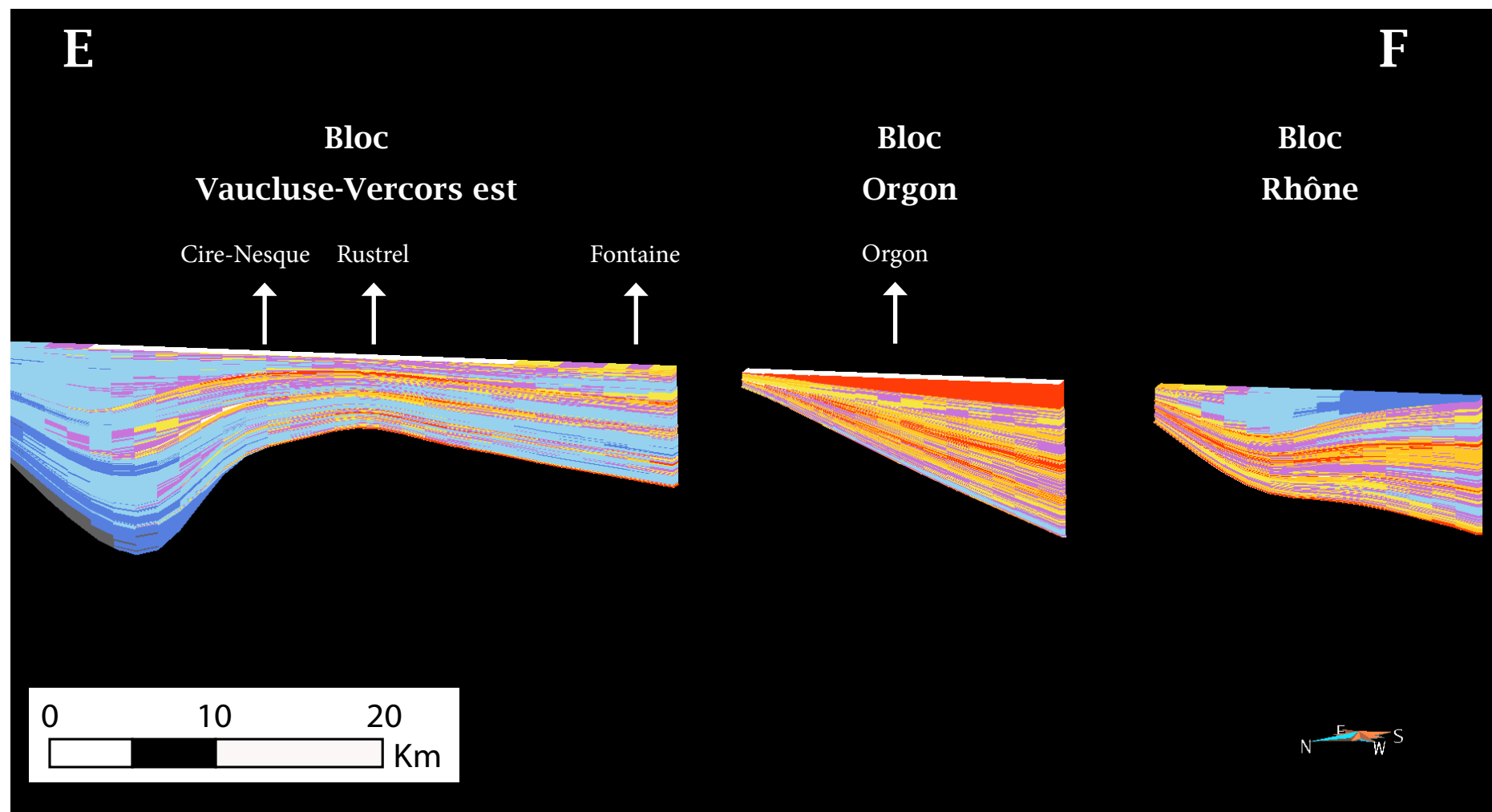


Figure 5-33 : Coupe nord-sud du modèle stratigraphique renseigné en environnements de dépôt, à travers les blocs Rhône, Orgon et le sud du bloc Vacluse - Vercors-est. L'exagération verticale est de facteur 15.



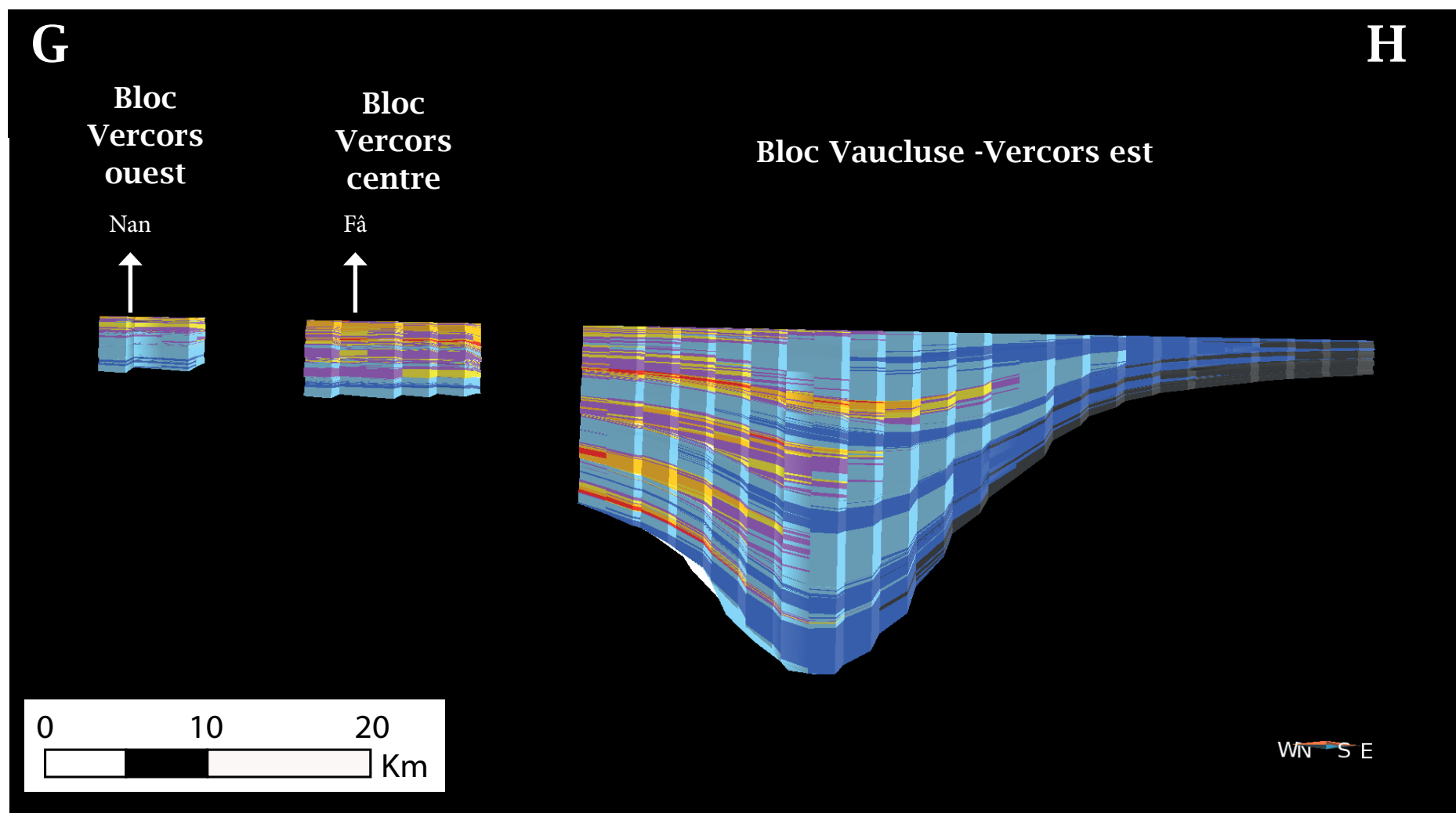


Figure 5-34 : Coupe est-ouest du modèle stratigraphique renseigné en environnements de dépôt à travers le bloc est du Vercors. L'exagération verticale est de facteur

15.

A une échelle plus fine, les environnements de dépôts modélisés respectent les lois de la stratigraphie séquentielle (Van Wagoner *et al.*, 1988). Les valeurs des associations de faciès évoluent de manière à représenter des environnements de dépôt de plus en plus externes depuis la limite de séquence jusqu'à la surface d'inondation maximum. L'évolution s'inverse ensuite pour retrouver les faciès les plus internes au niveau de la limite de la séquence supérieure.

Le résultat de la simulation des valeurs d'association de faciès au niveau de chaque limite remarquable est visible de la Figure 5-35, p. 219 à la Figure 5-50, p. 234

La base de chacune des séquences est caractérisée par le non-dépôt de sédiment sur la plateforme urgonienne. La sédimentation se fait uniquement sur les bordures de plateforme et dans les bassins Vocontien et Bédoulien où les principaux faciès modélisés sont des faciès granulaires fins (AF2) et grossier (AF3). Il est également possible d'observer l'avancée de ces faciès granulaires vers le bassin Vocontien depuis la séquence Ba3 jusqu'à la séquence A1. A la base de cette dernière séquence, des associations de faciès sont simulées dans les blocs Rhône et Provence sud. L'ouverture du bassin de la Bédoule est ainsi représentée. Ces observations correspondent aux concepts d'évolution de la plateforme définis dans cette étude.

La progradation des séquences implique une avancée de la ligne de rivage vers le bassin depuis la séquence Ba3 jusqu'à la séquence A1. Dans le secteur du Vercors, la limite entre les cellules renseignées en association de faciès et les cellules sans valeurs progressent effectivement vers le bassin. Seule la limite représentée dans le bloc est, à la séquence Ba3, est trop proche du bassin. En revanche, sur la bordure sud du bassin Vocontien, l'avancée de la ligne de rivage est très mal représentée.

Ceci est dû à un problème de résolution lors de la sélection des cellules dont l'épaisseur est proche de zéro, dans lesquelles les valeurs d'association de faciès simulées ont été supprimées (toute dernière étape de la modélisation). La condition utilisée pour sélectionner ces cellules n'était pas assez restrictive et a englobé trop, ou pas assez, de cellules.

Au Barrémien, dès la base des cortèges transgressifs, des valeurs d'association de faciès sont attribuées à l'ensemble des cellules. Les faciès simulés sur la plateforme urgonienne sont des faciès internes (AF6 et AF5) et passant progressivement à des faciès de plus en plus externes jusqu'à la surface d'inondation maximum.

Dans la séquence A1, l'attribution de valeurs d'association de faciès sur la plateforme ne

se fait qu'au milieu du cortège transgressif. Ce qui signifie qu'à la base de ce cortège, le niveau marin n'est pas encore assez élevé pour recouvrir la plateforme. En outre, des faciès sont simulés dans les blocs Rhône et Provence sud allant de faciès de lagon interne (AF2), jusqu'au faciès de bassin (AF7). La sédimentation dans le bassin de la Bédoule est ainsi représentée.

Le dépôt de sédiments sur la bordure nord du bloc d'Orgon n'est simulé qu'au milieu du cortège transgressif. Cela illustre bien le basculement et la surélévation de ce bloc par rapport aux autres qui sont entièrement submergés dès la base de ce cortège.

La comparaison des valeurs d'association de faciès simulées à la base des cortèges transgressifs des quatre séquences permet d'observer le recul des faciès les plus externes vers le centre du bassin Vocontien. L'évolution des faciès entre la séquence Ba4, Ba5 et A1 simule correctement la progradation de la plateforme. En revanche, les valeurs d'associations de faciès simulées à la base du cortège transgressif de la séquence Ba3 représentent des environnements de dépôt trop internes. Seuls les blocs du Gard (nord et sud), le bloc Vercors centre ainsi que la partie nord du bloc Montélimar affichent des environnements de dépôt plus externes que ceux simulés au niveau de la base du cortège transgressif de la séquence Ba4.

Les valeurs d'associations des faciès les plus externes sont simulés au niveau des surfaces d'inondation maximum. La progradation de la plateforme urgonienne est illustrée par l'évolution des faciès de plus en plus internes depuis la séquence Ba3 jusqu'à la séquence A1. Seules quelques attributions d'association de faciès dans certains secteurs et à certains niveaux sont contraires à cette évolution. Au niveau de la surface d'inondation maximum de la surface Ba4, les environnements de dépôt correspondant aux associations de faciès simulées dans la partie sud du bloc Vaucluse-Vercors-est, ainsi que dans le bloc de Sainte-Croix sont trop externes. Dans la séquence Ba5, trop de faciès granulaires ont été simulés dans le bloc nord du Gard et au niveau du secteur ardéchois.

Les cellules situées sur la bordure nord du bloc d'Orgon n'ont pas d'association de faciès dans les séquences Ba4 et Ba5. L'épaisseur de série urgonienne érodée au niveau des limites de séquences supérieures est plus importante que celle du cortège de haut niveau des séquences Ba4 et Ba5. Ce phénomène d'érosion important en tête de ce bloc illustre sa surélévation importante et son basculement.

Dans chaque séquence, depuis la surface d'inondation maximum jusqu'au sommet du

cortège de haut niveau, les associations de faciès simulées correspondent à des environnements de dépôt de plus en plus internes.

Le sommet des cortèges de haut niveau est caractérisé par le grand nombre de cellules sans données d'association de faciès. Ces cellules représentent les zones érodées et ont une épaisseur nulle. Du cortège Ba3 au cortège A1, la superficie de ces zones est de plus en plus réduite dans les blocs Rhône et Provence sud. Cela illustre la subsidence de plus en plus importante de ces blocs qui permet finalement l'ouverture du bassin de la Bédoule à l'Aptien. Au contraire, de par leur surélévation, les blocs d'Orgon et de Provence nord sont émergés au sommet des séquences Ba4, Ba5 et A1.

Plusieurs anomalies, dues à la sélection des cellules dont les valeurs d'association de faciès ont été éliminées, sont visibles au sommet de ces séquences : au sud des blocs d'Orgon et de Provence nord au sommet de la séquence A1 ainsi que quelques cellules avec des valeurs d'association de faciès au milieu de zones érodées au sommet des séquences Ba3 et Ba4, et inversement au sommet du cortège Ba5.

Les faciès granulaires fins (AF2) simulés au sud du bloc Gard sud au sommet du cortège A1 sont en contradiction avec les concepts d'évolution de la plateforme proposés dans cette étude. Ils sont le résultat d'une mauvaise répartition de la paléobathymétrie dans ce secteur.

En revanche, malgré l'attribution d'une paléobathymétrie plus faible au sommet de la séquence A1 qu'au sommet de la séquence Ba5, les associations de faciès simulées dans le sud des blocs Vaucluse-Vercors-est et de Sainte Croix sont plus externes au sommet de la séquence A1.

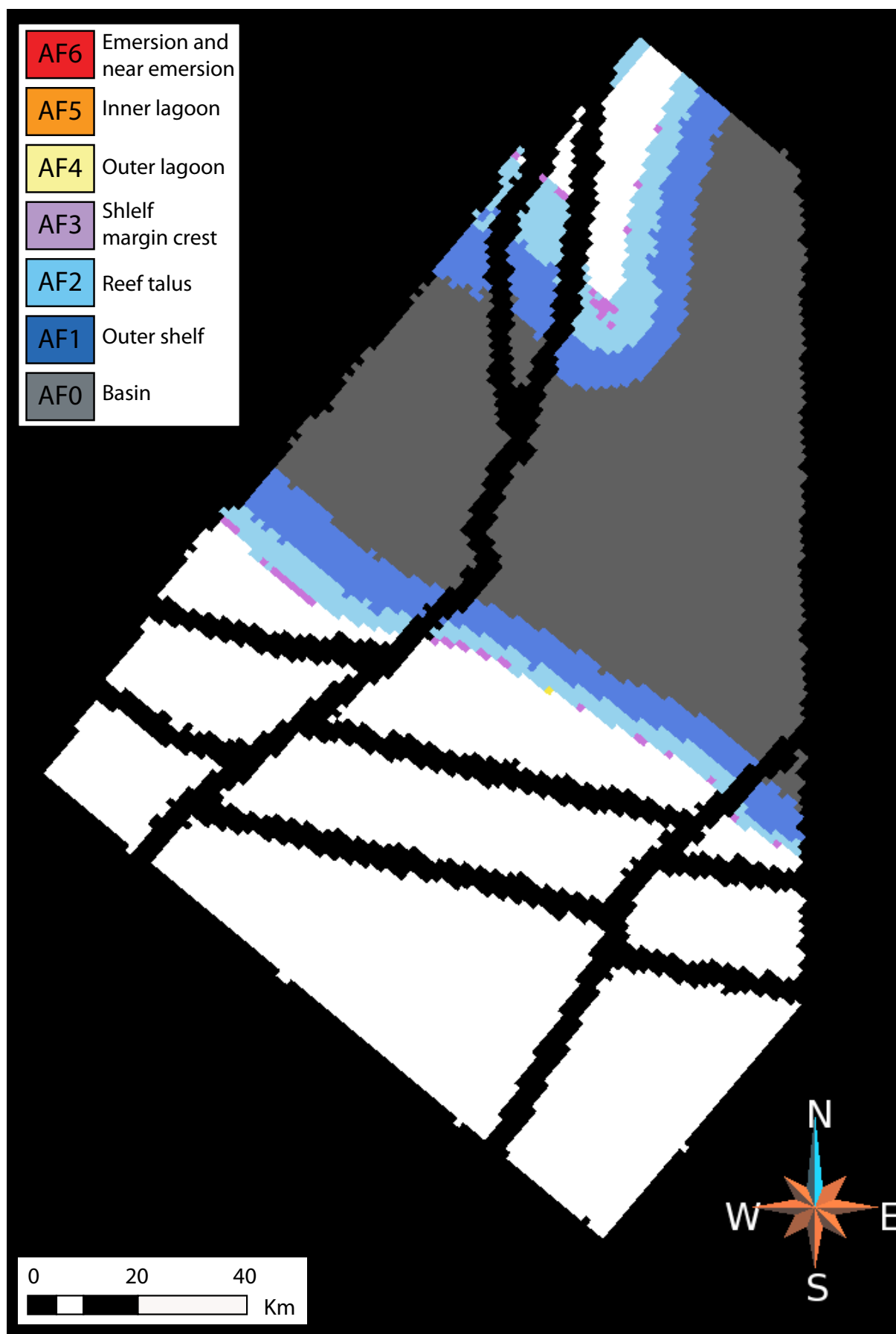


Figure 5-35 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège de bas niveau de la séquence Ba3, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

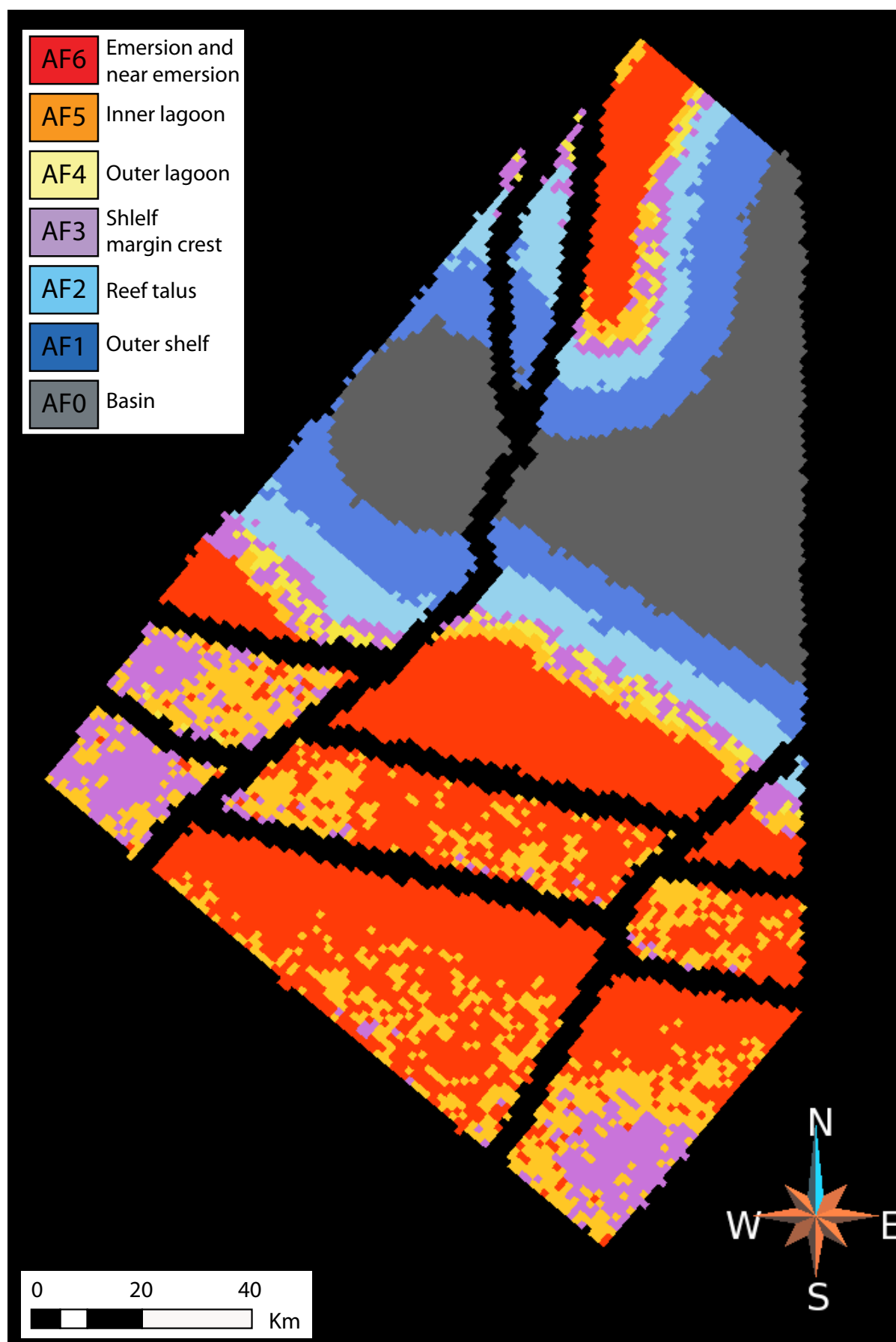


Figure 5-36 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège transgressif de la séquence Ba3, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.



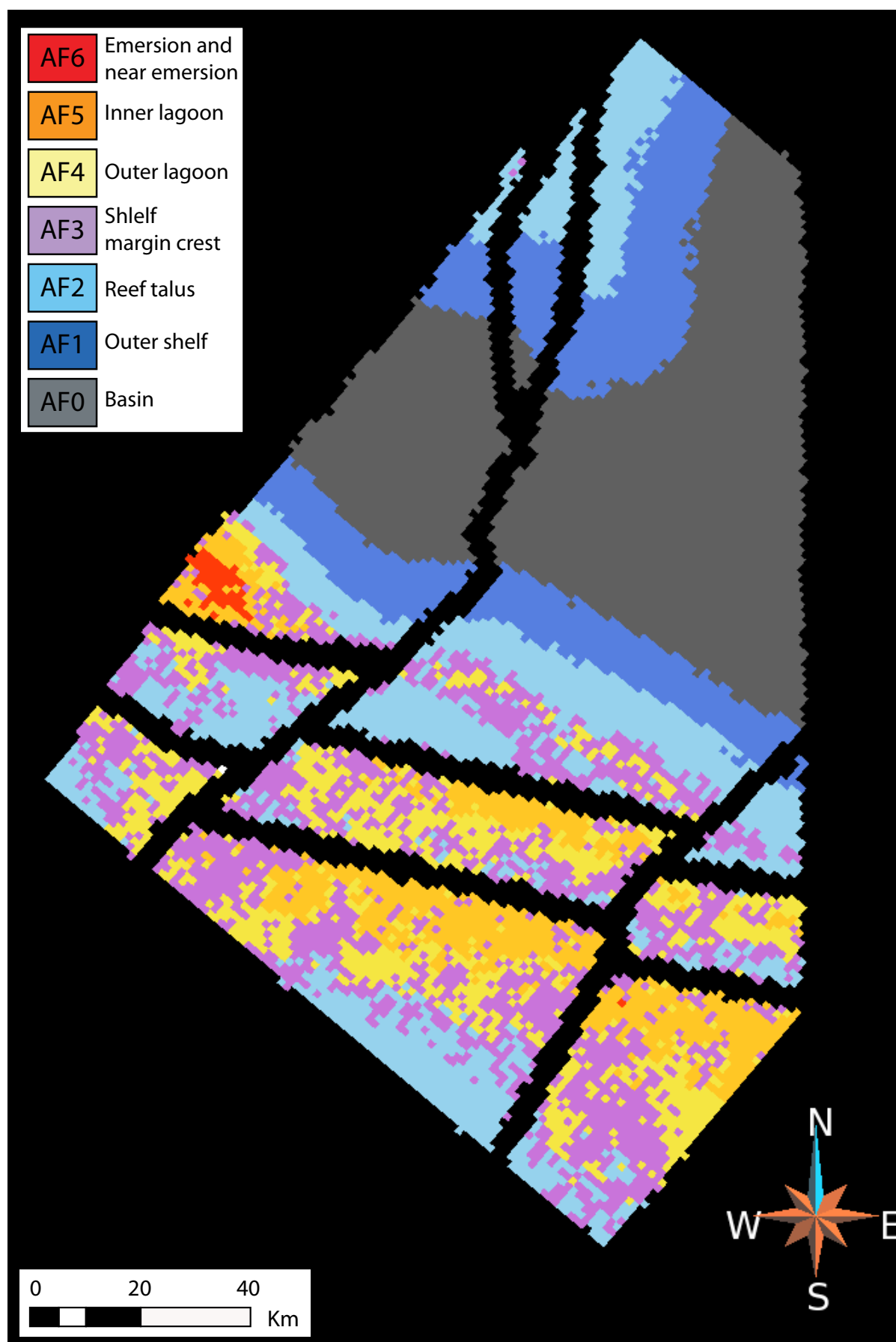


Figure 5-37 : Vue de la couche numérique, située au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba3, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

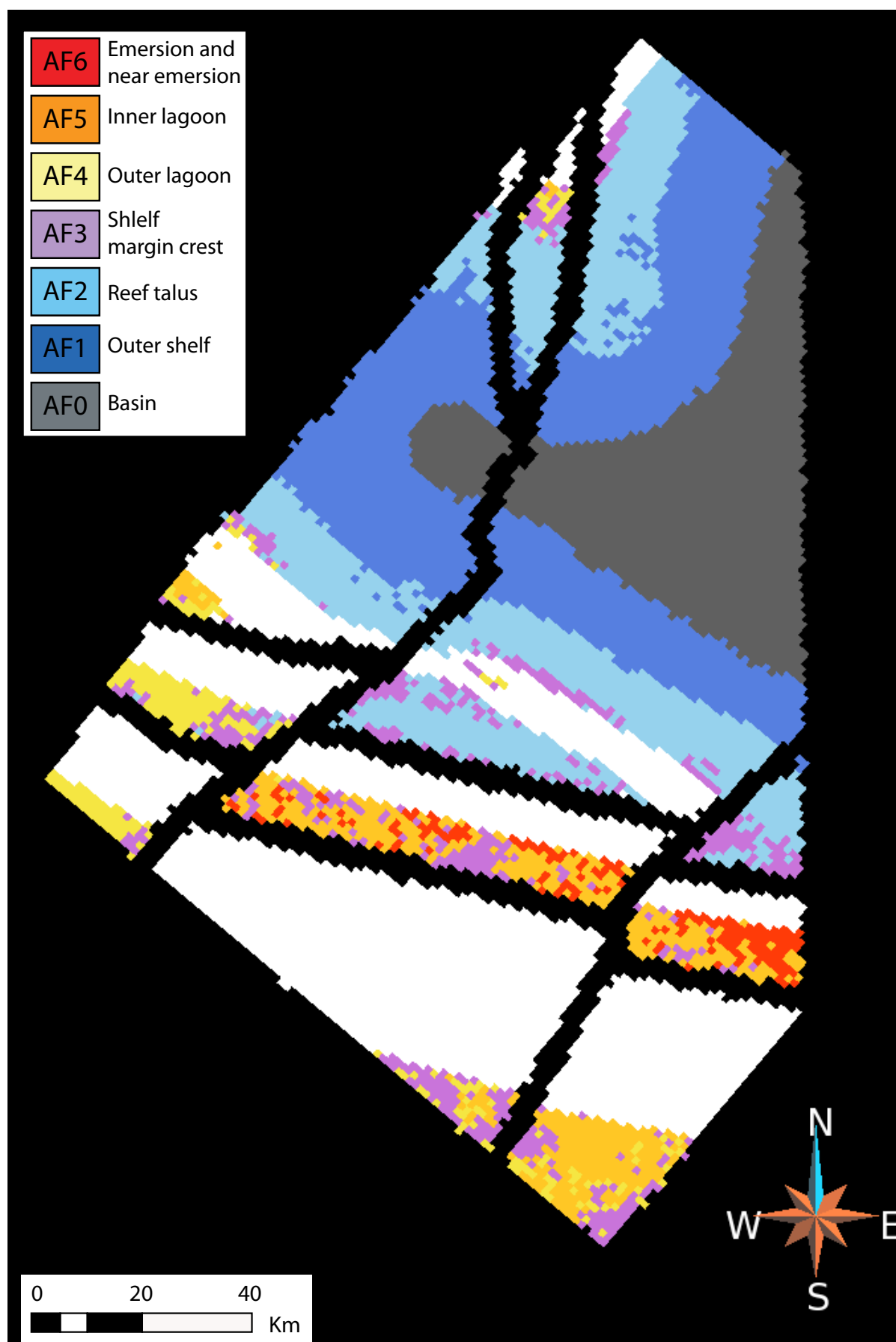


Figure 5-38 : Vue de la couche numérique, située au sommet du cortège de haut niveau de la séquence Ba3, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

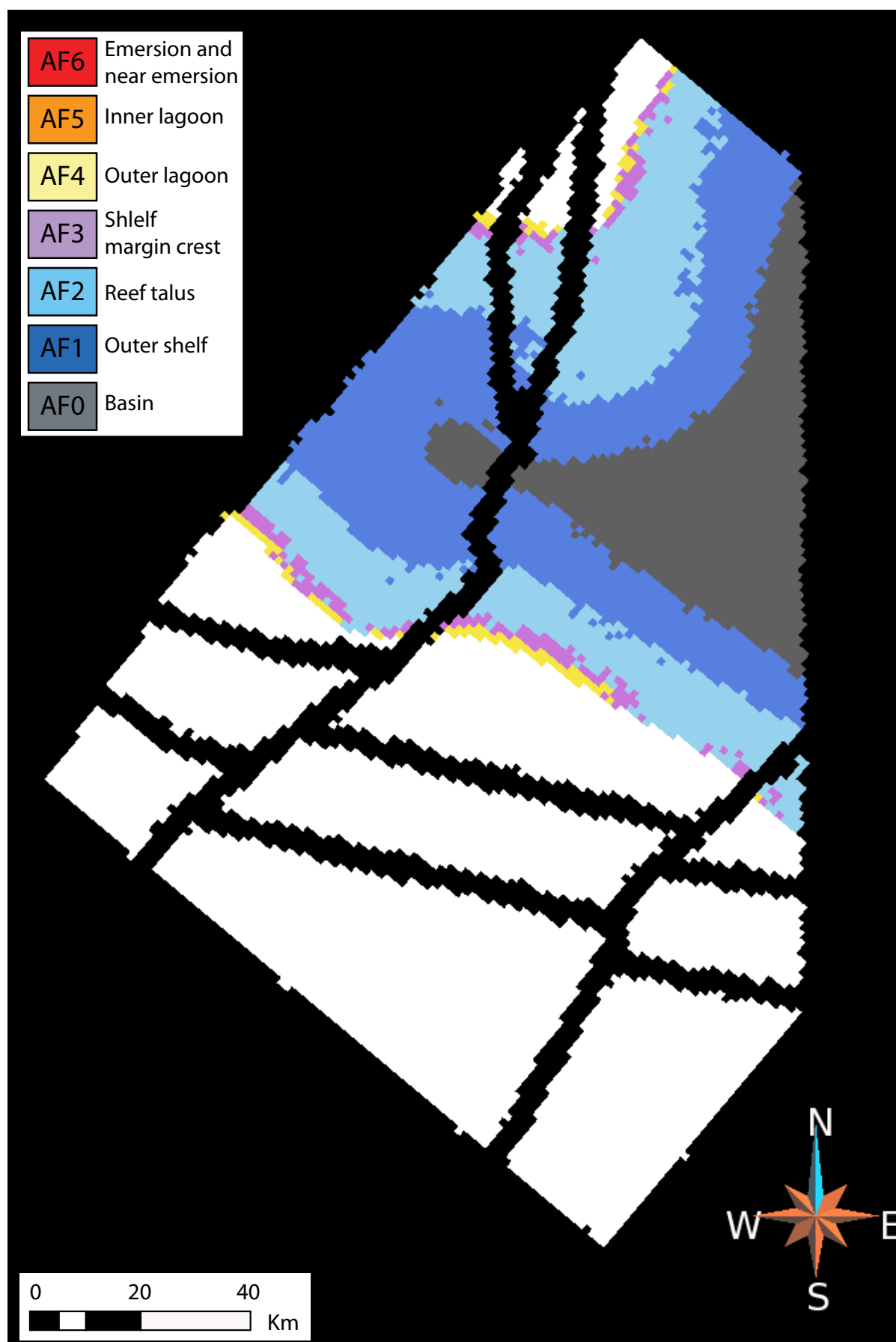


Figure 5-39 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège de bas niveau de la séquence Ba4, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

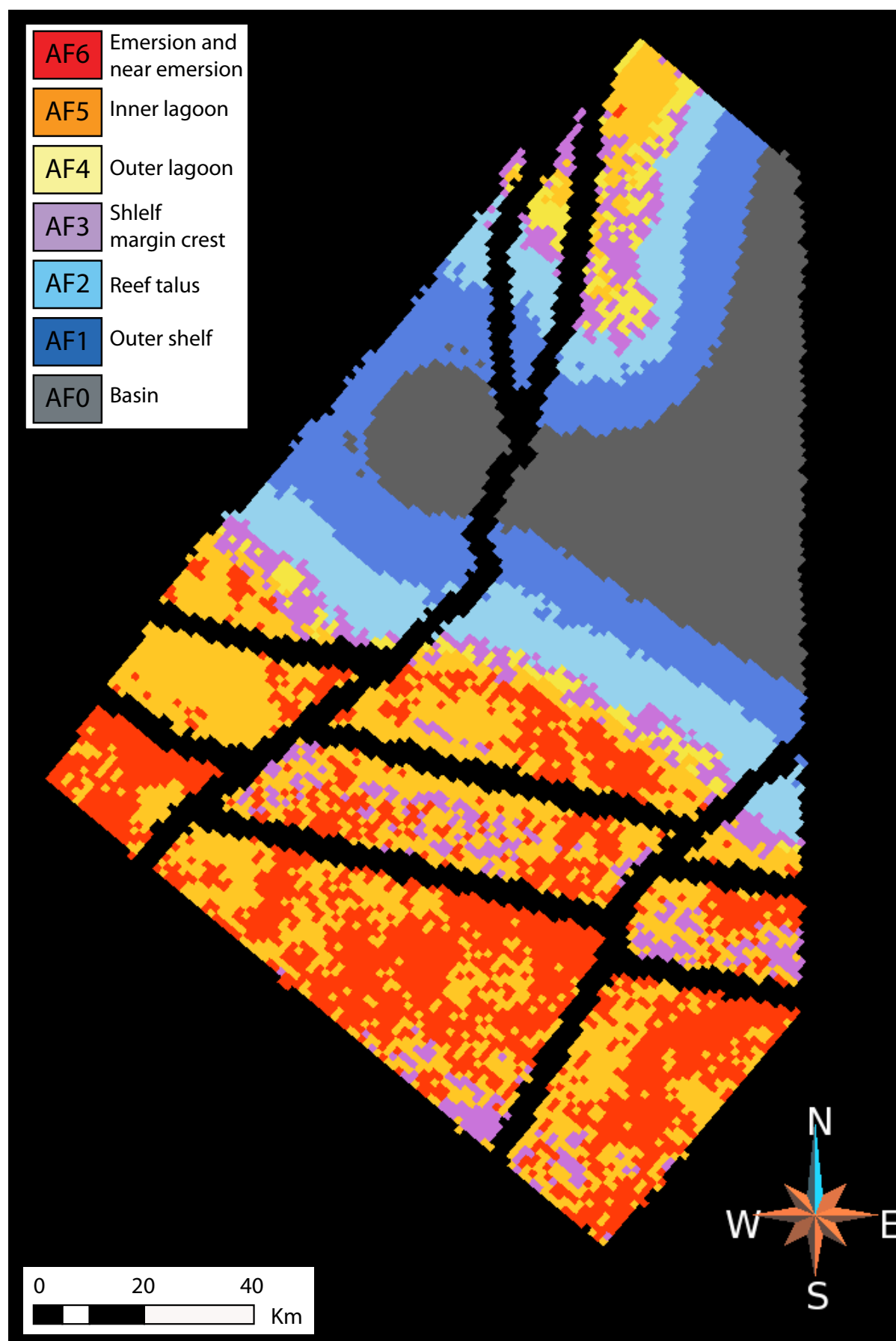


Figure 5-40 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège transgressif de la séquence Ba4, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

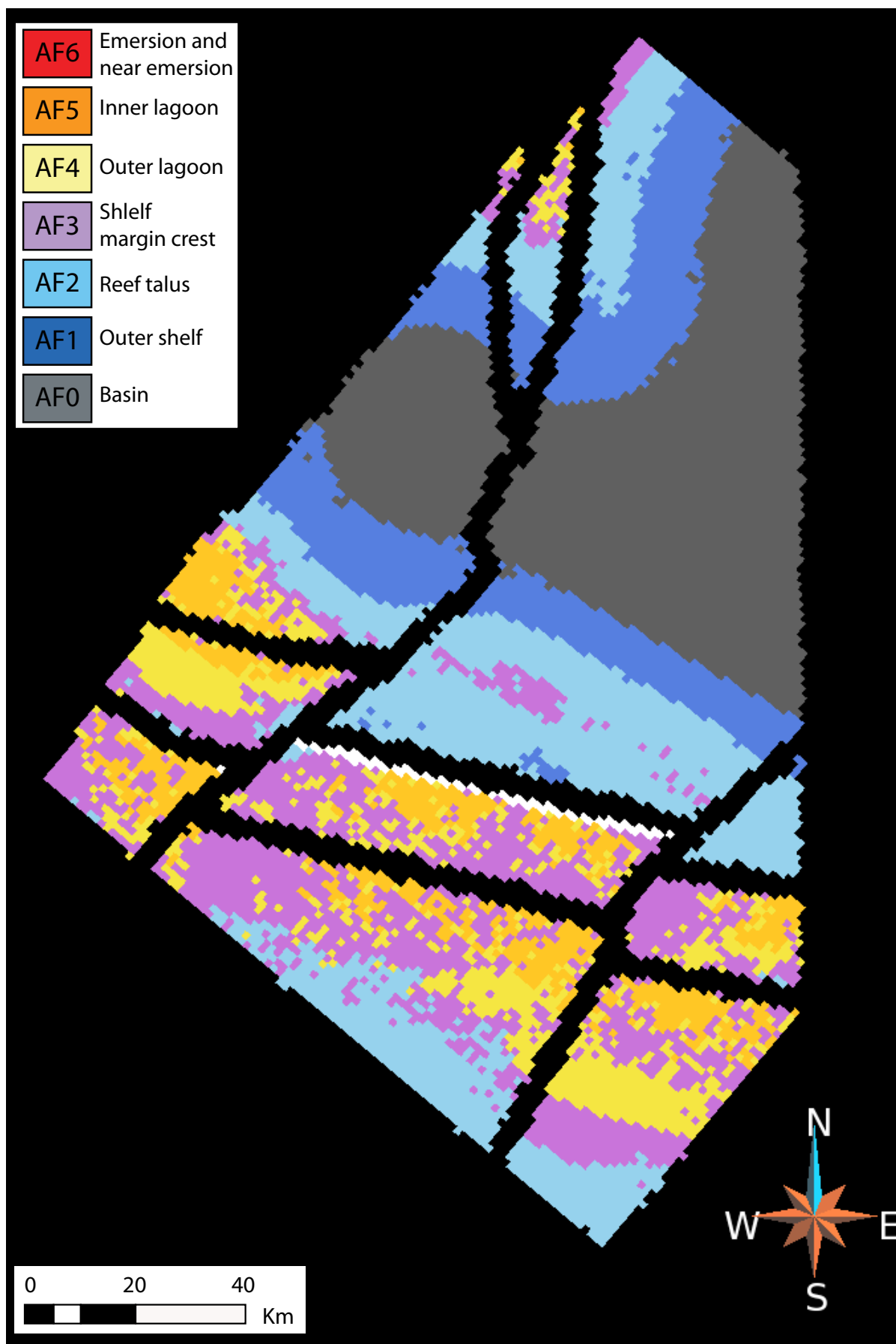


Figure 5-41 : Vue de la couche numérique, située au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba4, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

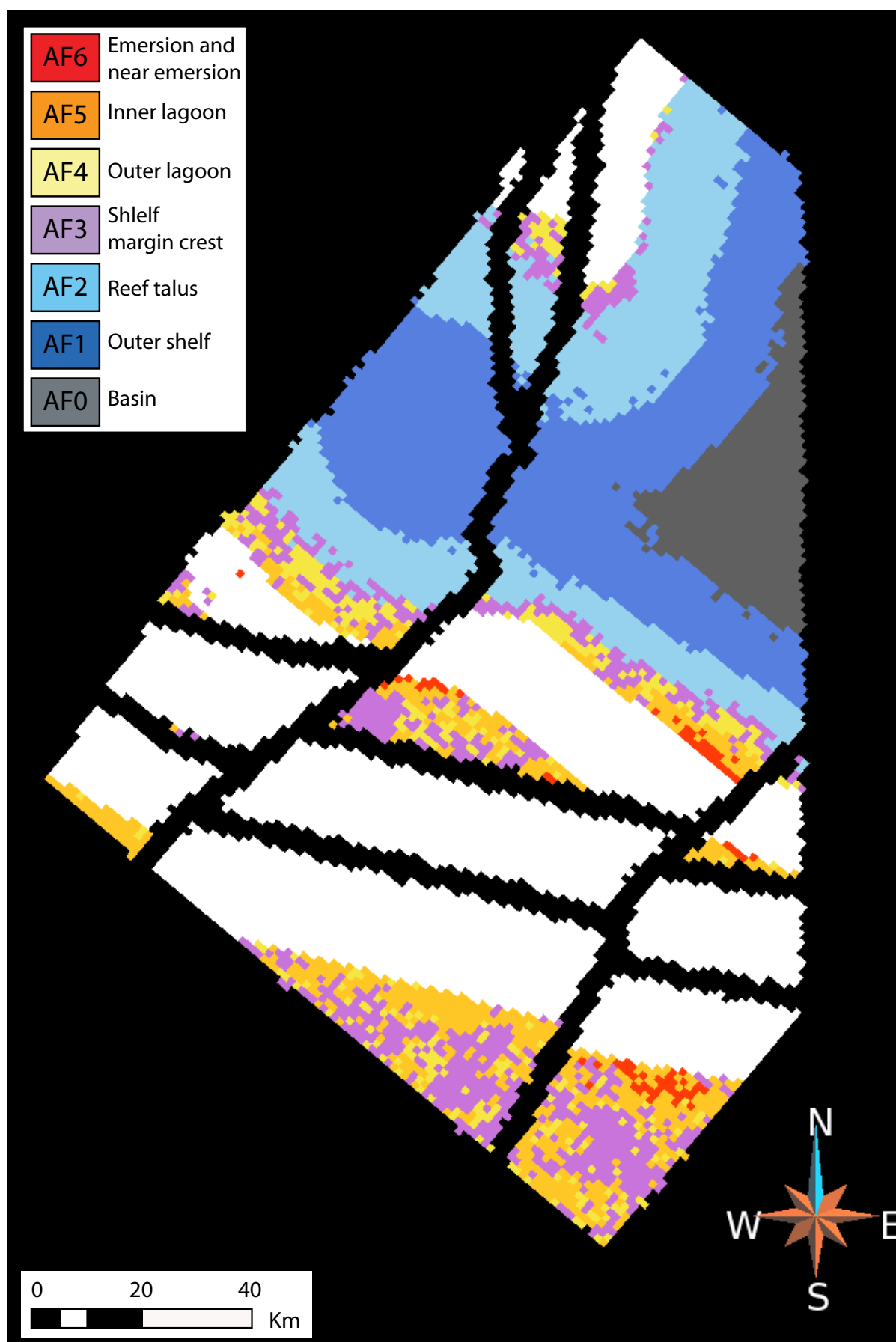


Figure 5-42 Vue de la couche numérique, située au sommet du cortège de haut niveau de la séquence Ba4, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.



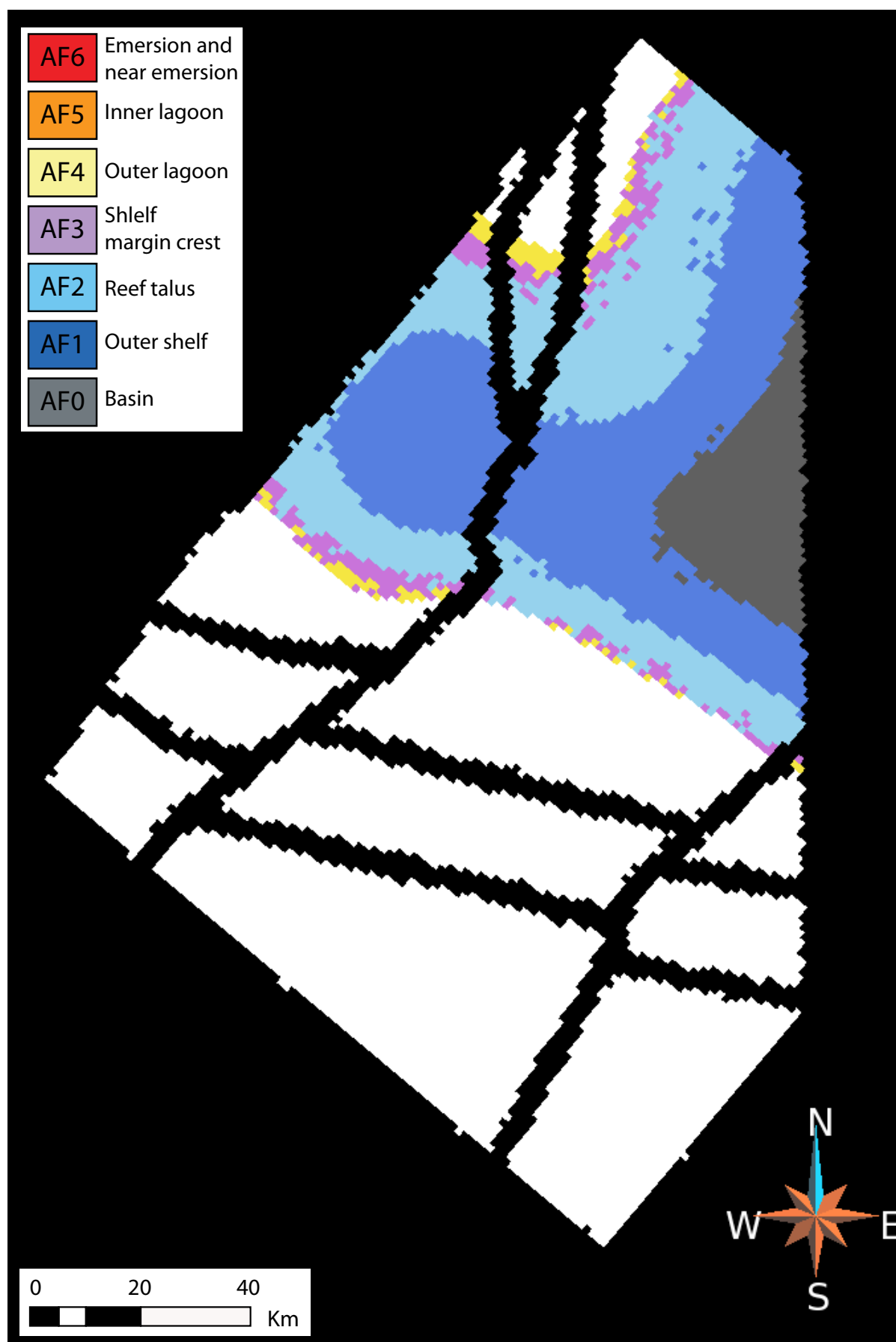


Figure 5-43 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège de bas niveau de la séquence Ba5, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

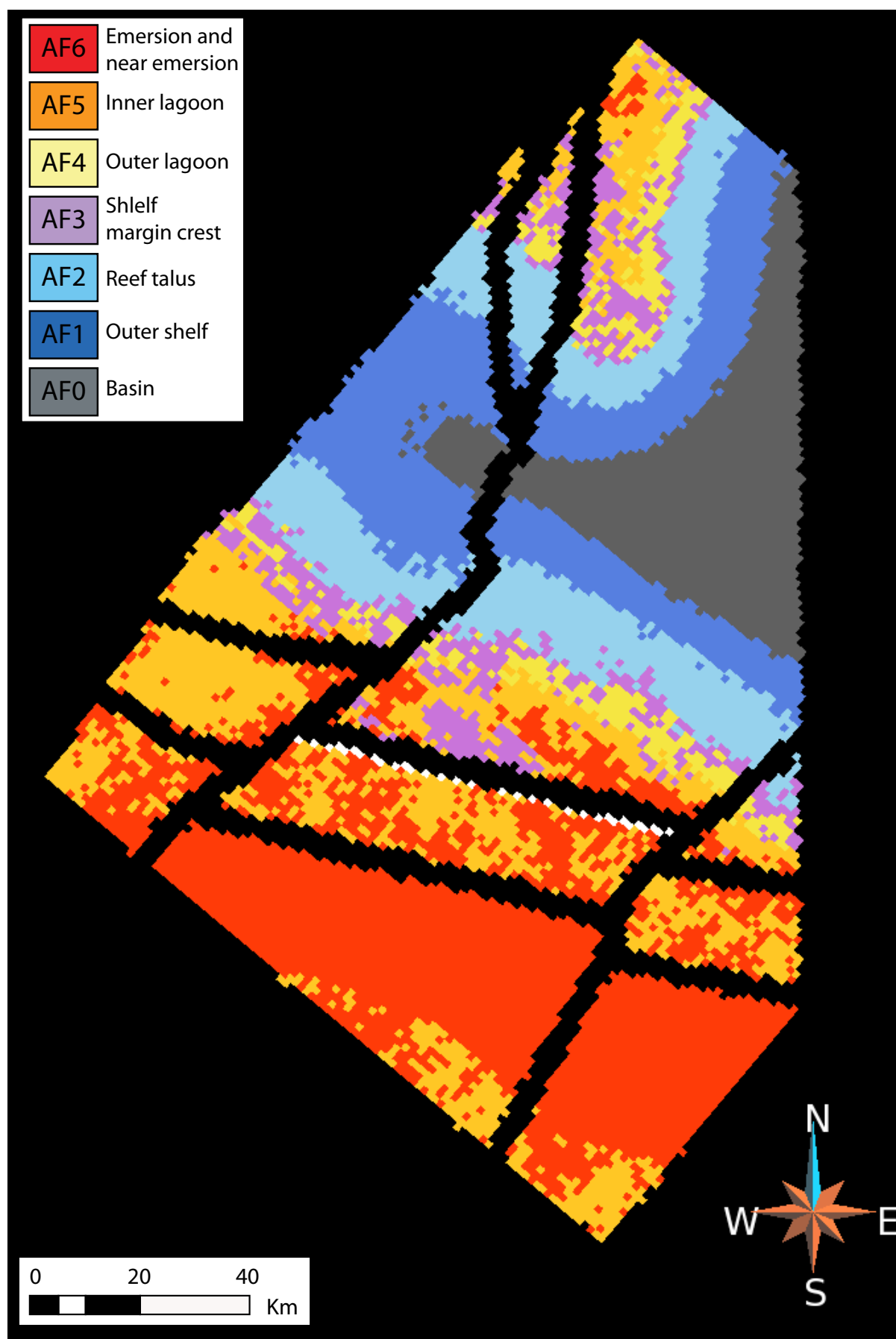


Figure 5-44 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège transgressif de la séquence Ba5, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

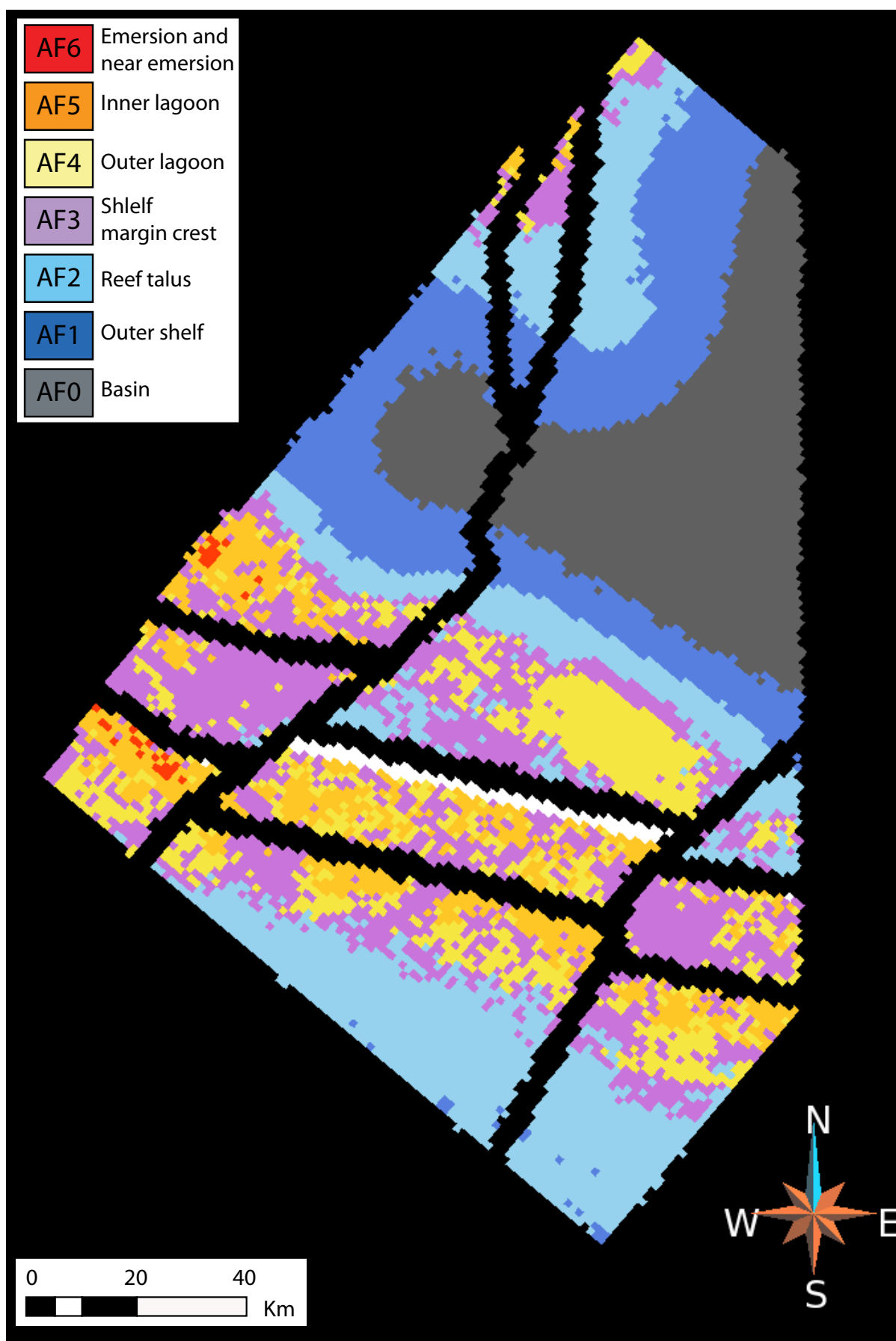


Figure 5-45 : Vue de la couche numérique, située au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba5, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

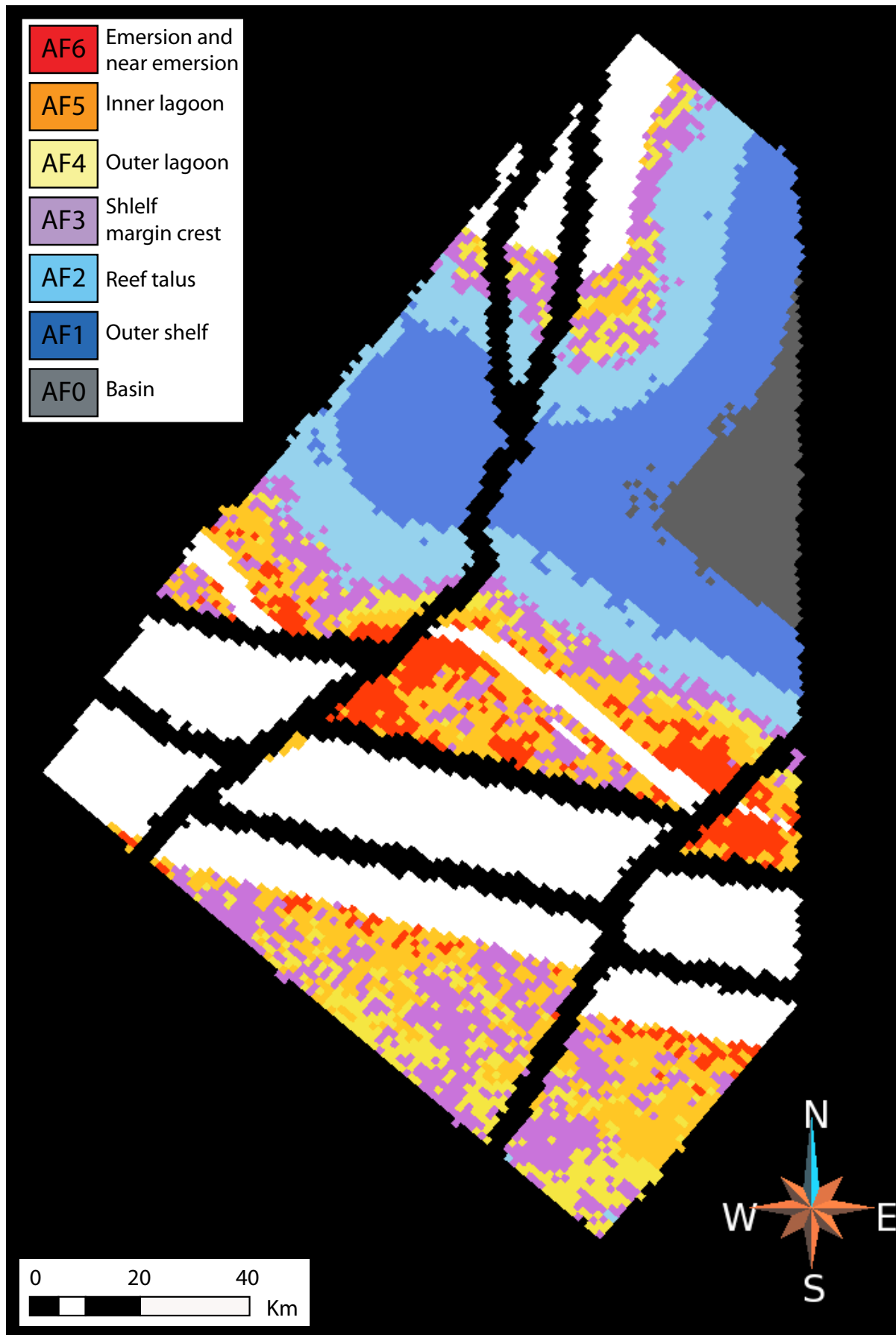


Figure 5-46 Vue de la couche numérique, située au sommet du cortège de haut niveau de la séquence Ba5, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

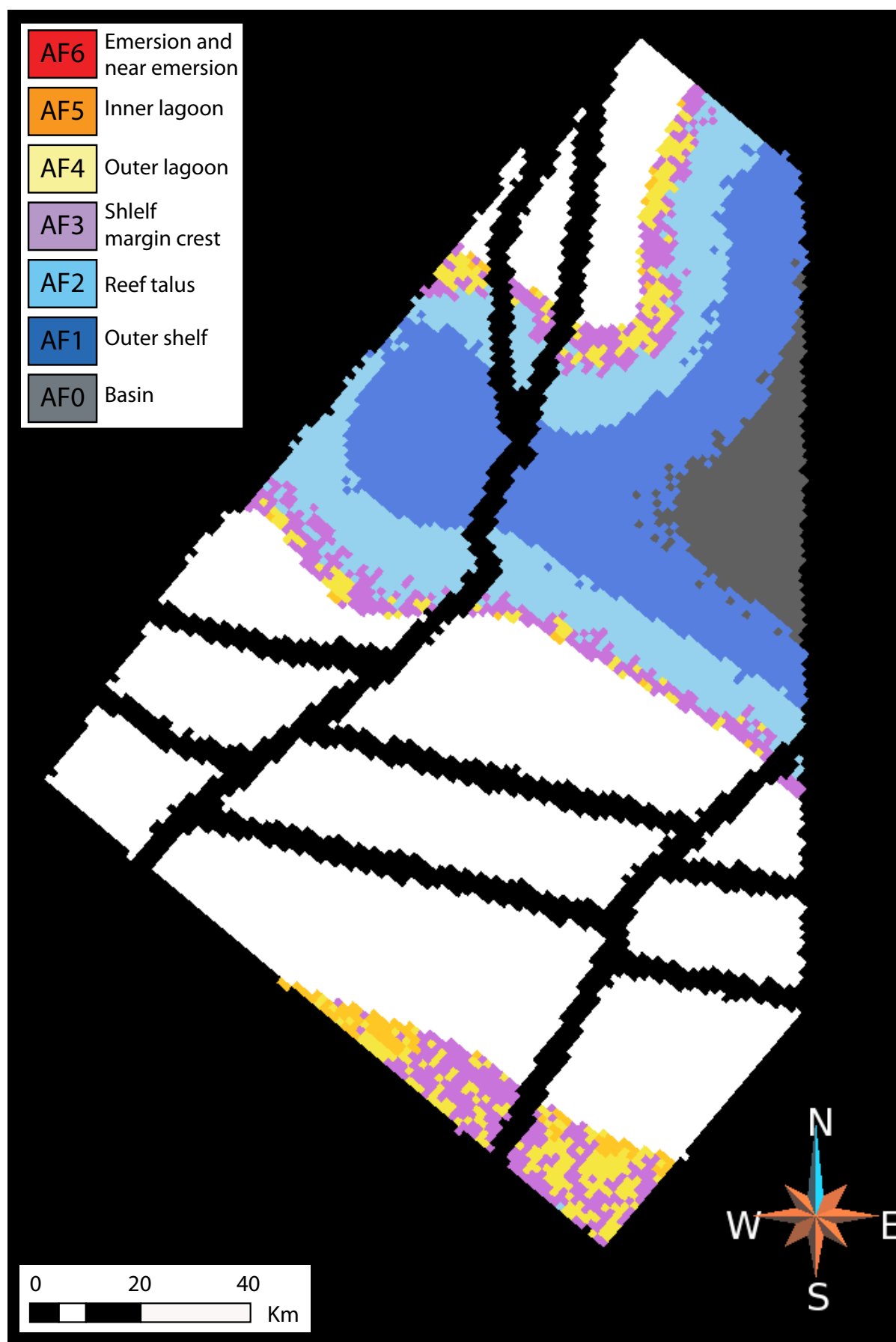


Figure 5-47 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège de bas niveau de la séquence A1, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

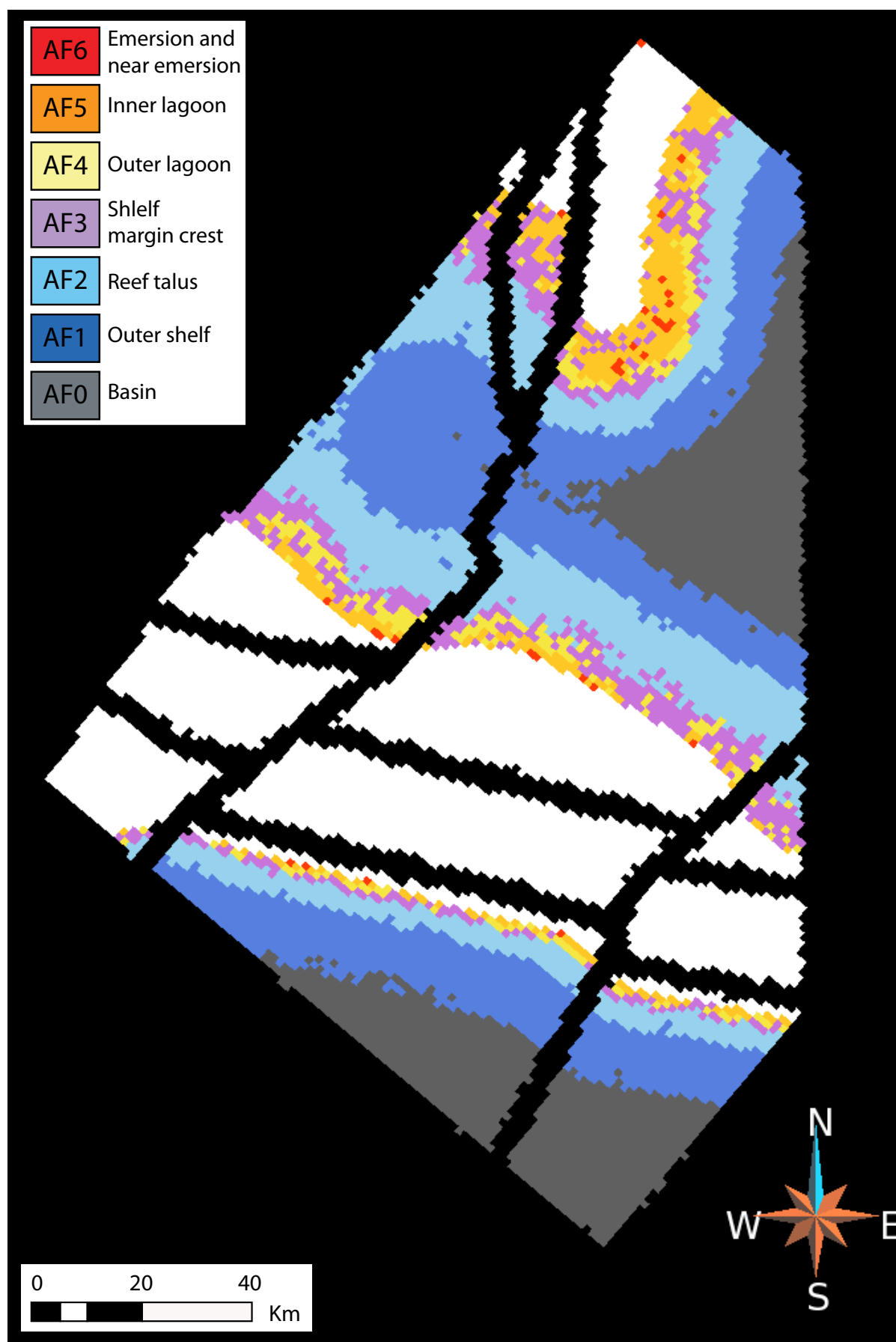


Figure 5-48 : Vue de la couche numérique, située à la base du cortège transgressif de la séquence A1, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.



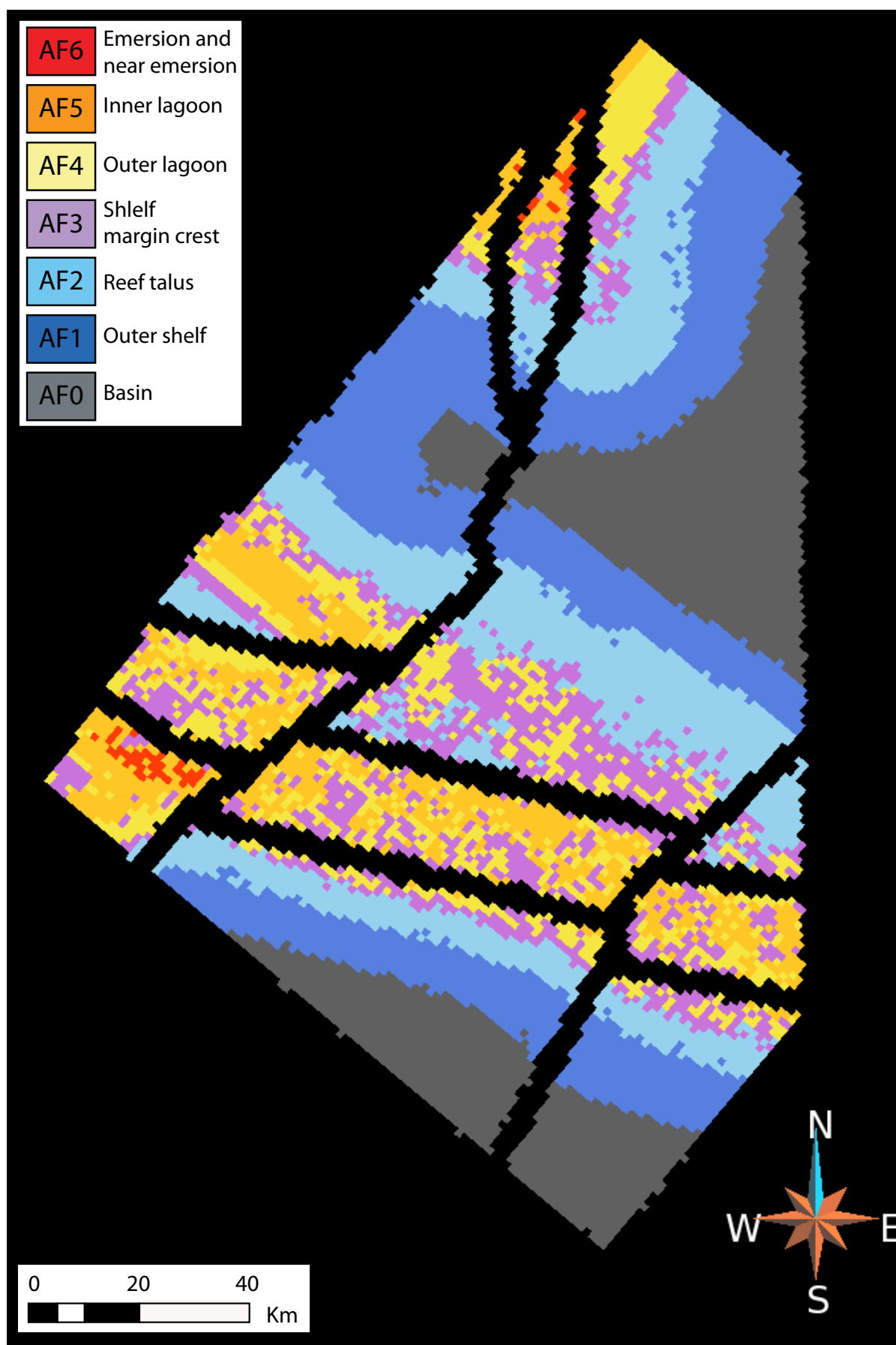


Figure 5-49 : Vue de la couche numérique, située au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence A1, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

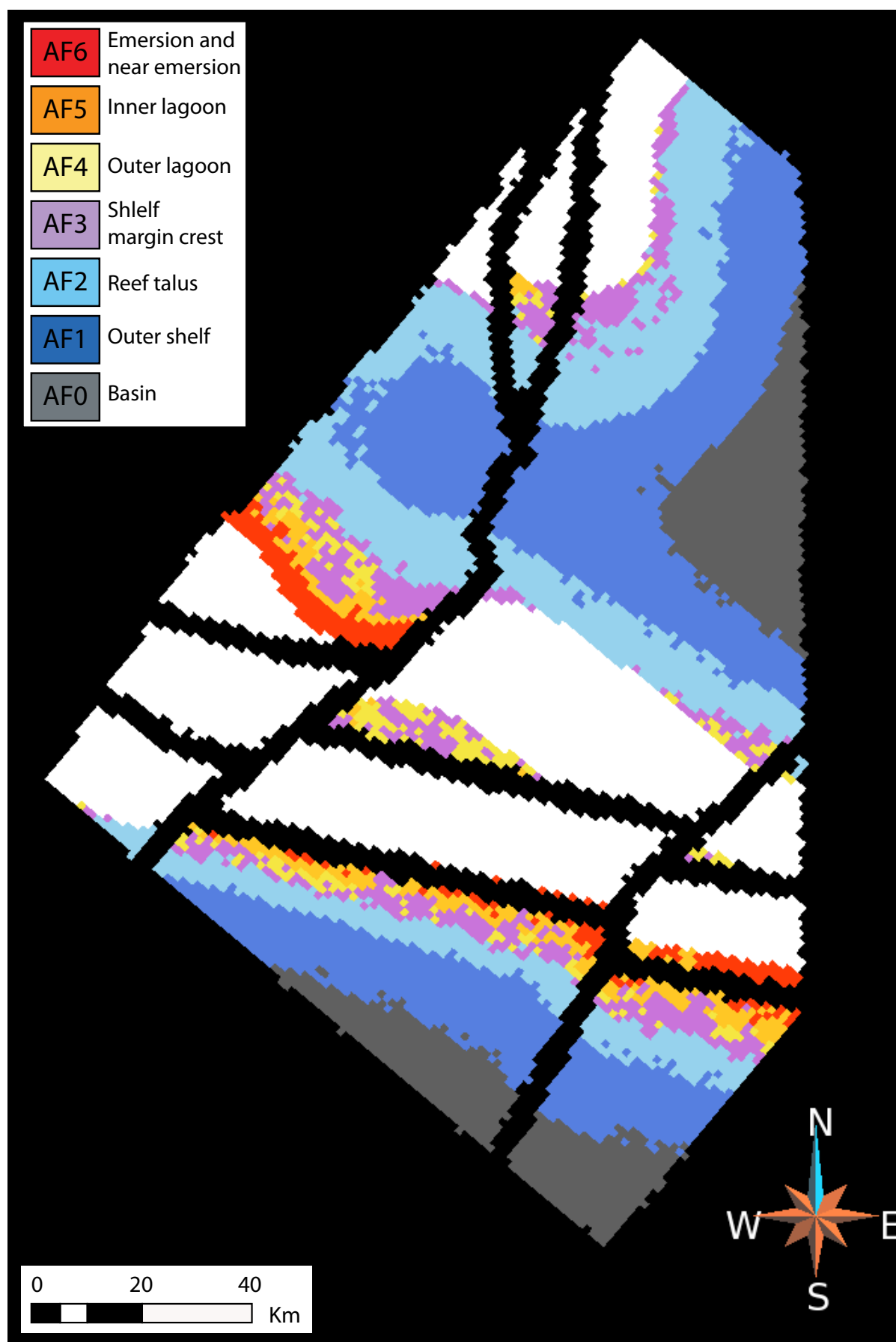


Figure 5-50 Vue de la couche numérique, située au sommet du cortège de haut niveau de la séquence Ba5, de la grille structurale renseignée en environnement de dépôt.

### 3.3 ÉTUDE DES RÉSIDUS

Il doit être précisé que cette étude a été réalisée à partir des valeurs de facteur commun, de résidu et d'accommodation provenant d'un premier modèle qui englobait l'ensemble de la série urgonienne en 100 couches numériques. Les mêmes cartes d'épaisseurs, de paléoprofondeur d'eau, d'épaisseurs érodées, ainsi que les mêmes variogrammes ont été utilisés pour construire ce modèle. Certes, de part l'épaisseur plus grande des cellules, la résolution de ce modèle est moins importante que celle du modèle en 400 couches, mais, hormis quelques erreurs dues à une distribution insuffisamment fine des couches, l'étude de ces résidus permet une critique tout à fait identique à celle qui aurait pu être réalisée à partir des valeurs du modèle en 400 couches.

Étudier précisément les résidus n'est pas une étape à négliger car cela permet de savoir dans quelle mesure les concepts géologiques qui ont été intégrés au fil des étapes de la modélisation expliquent les variations de paléoprofondeur d'eau observées aux puits. En effet, pour une valeur d'accommodation, si la proportion de résidu est plus importante que celle du facteur commun, cela implique que ce qui est considéré comme erreur compense ce qui est sensé représenter les facteurs qui contrôlent l'évolution de la plateforme urgonienne. Afin de critiquer les théories avancées lors de la construction de ce modèle, les résidus ont été étudiés de différentes manières.

Dans un premier temps, pour avoir une vision globale de la proportion des résidus et des facteurs communs sur l'accommodation, la moyenne et la variance des valeurs absolues de ces variables ont été calculées. Elles sont visibles dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 5-2, p. 235).

	Facteur Commun	Résidus	Accommodation
Moyenne	4,438	1,531	4,463
Variance	9,208	2,302	11,017

**Tableau 5-2 : Tableau comparatif des valeurs de moyenne et de variance des valeurs absolues des facteurs communs, résidus et des accommodations.**

Les valeurs de moyenne et de variance des valeurs absolues des facteurs communs sont très proches de celles des accommodations tandis que celles des résidus sont bien inférieures. Ce premier résultat montre que dans son ensemble, les facteurs communs expliquent dans une proportion bien plus importante que celle des résidus les valeurs d'accommodation et donc les variations de paléoprofondeur d'eau.

Afin de mieux quantifier cette proportion, le rapport résidu sur facteur commun a été étudié en détail. Sur 812 échantillons (cellules contenant des valeurs de facteur commun, de résidu et d'accommodation) :

- 565 présentent un rapport inférieur à 0,5 ; 70% des résidus peuvent être considérés comme tout à fait négligeables.
- 132 ont un rapport compris entre 0,5 et 1 ; 16% des résidus sont considérés comme négligeable.
- 40 ont un rapport supérieur à 1 mais une valeur de résidu inférieur à 1,5 ; 5% des résidus dont la valeur est supérieure au facteur commun sont acceptables.
- 737 valeurs de résidus sur 812 soit 90% montre une cohérence entre les données aux puits et les théories avancées lors de la construction du modèle.

Parmi les 10% restant,

- 7% pourraient être corrigés en redessinant les courbes de paléoprofondeur d'eau créées dans le logiciel WakeUp. La majorité de ces cellules se situent autour des surfaces d'inondation maximum (mfs). Les valeurs absolues d'accommodation déduites de ces courbes sont souvent plus importantes autour de la mfs et moins importante au niveau de la mfs que celles du facteur commun. Cela signifie que l'augmentation d'espace disponible au niveau de ces mfs sur ces puits se fait plus rapidement, dans un intervalle de temps plus court.
- 3%, soit 21 valeurs sur 812 correspondent véritablement à des erreurs d'interprétation de faciès, de paléoprofondeur d'eau, de découpage stratigraphique ou de méthode.

Ces résultats peuvent être visualisés sur la Figure 5-51, p. 237. Ce graphique représente les valeurs de facteur commun en fonction des valeurs d'accommodation. Le coefficient de détermination calculé sur l'ensemble des données est de 0,65 ce qui correspond à un coefficient de corrélation entre ces deux variables de 0,81.

L'ensemble des méthodes utilisées pour quantifier la qualité des résultats (comparaison des moyennes et variances des facteurs communs, résidus et accommodation, étude du rapport résidu sur facteur commun et détermination du coefficient de corrélation entre le facteur commun et l'accommodation) prouvent que la géométrie de la série urgonienne et les évolutions de paléoprofondeur d'eau intégrées aux différentes étapes de modélisation sont cohérentes avec l'ensemble des données intégrées au modèle.

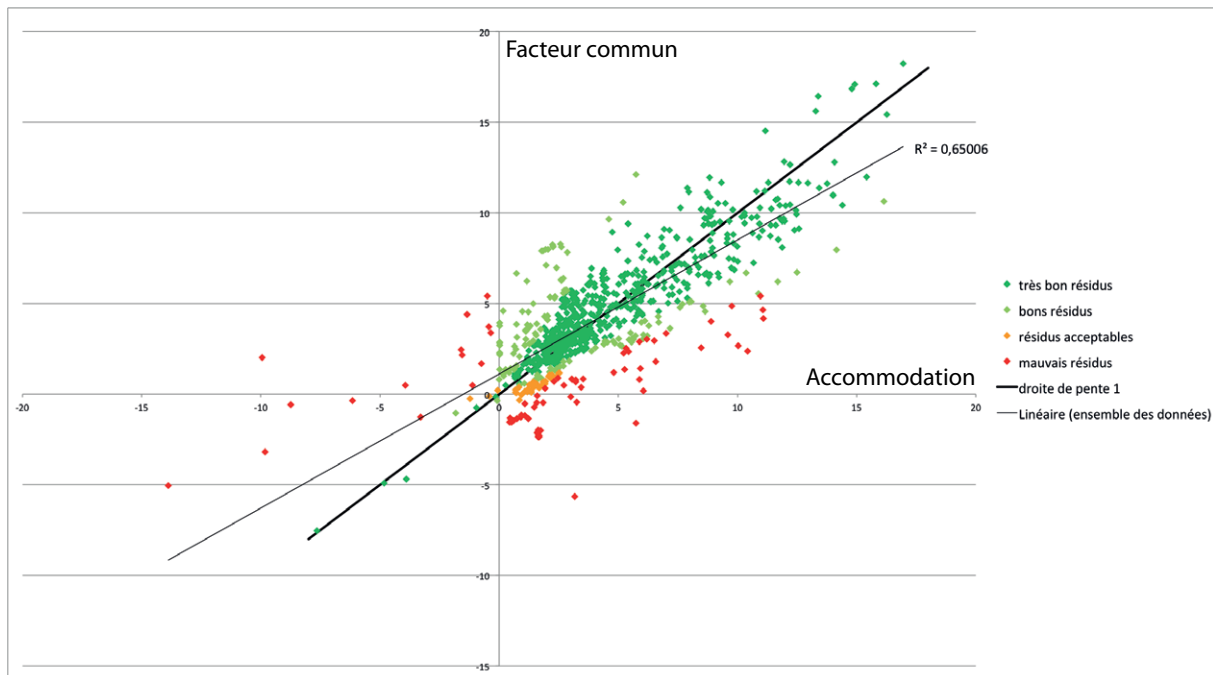


Figure 5-51 : Graphique représentant les valeurs de facteur commun redimensionné en fonction des valeurs d'accommodation.

### 3.4 PISTES D'AMÉLIORATION DU MODÈLE

Le modèle présenté à la fin de cette étude est un modèle abouti qui représente l'ensemble des concepts pensés par l'utilisateur et qui, comme le prouve le paragraphe précédent, respecte la grande majorité des données intégrées. Mais, comme toute représentation graphique, des points restent toujours à améliorer, soit par des rectifications, soit par des travaux supplémentaires, soit par des améliorations de logiciel. Une liste non exhaustive de ces points est présentée dans ce paragraphe.

Afin de représenter plus fidèlement la géométrie générale de l'Urgonien à la fin de la première séquence aptienne, deux améliorations géométriques pourraient être réalisées. La première serait de faire un travail de reconstruction du Sud-Est de la France à l'époque aptienne. Une étude des jeux des différentes failles et des plis ayant modelé l'Urgonien tel qu'observable aujourd'hui serait nécessaire. Les puits et coupes pourraient alors être replacées sur cette nouvelle carte paléogéographique.

Afin d'être plus juste géométriquement, le profil des failles délimitant les blocs basculés et engendrant des roll-overs devrait être redessiné avec une courbure proportionnelle à la distance de leur influence.

En ce qui concerne l'architecture interne de la série urgonienne, un choix dans la distribution des couches numériques entre deux surfaces (proportionnelle, parallèle au sommet ou parallèle à la base) a dû être fait par cortège. Il serait intéressant d'inclure dans le workflow de construction de la grille la possibilité d'attribuer des géométries différentes en fonction des régions de la grille, c'est-à-dire en fonction des blocs dans le cas de cette étude.

L'étude des résidus a montré que certaines courbes de paléoprofondeur d'eau pourraient être redessinées, particulièrement au niveau des surfaces d'inondation maximum. La modélisation des faciès de dépôt pourrait donc être améliorée en prenant compte des observations faites pendant l'étude des résidus.

Lors du calcul des valeurs d'accommodation, le logiciel interprète l'épaisseur des cellules comme égale à l'épaisseur des sédiments déposés. Une étude visant à quantifier les effets de la diagenèse sur l'épaisseur actuelle des cortèges sédimentaires pourrait apporter de la précision sur l'estimation des épaisseurs d'Urgonien sédimenté. Cela serait particulièrement profitable aux abords des failles et dans les zones de plis, ainsi que sous les limites de séquences où les effets de la dissolution peuvent être importants.

Une meilleure sélection des cellules dont l'épaisseur est proche de zéro, avant la suppression des valeurs d'association de faciès simulées dans ces cellules, permettrait une meilleure représentation de la progradation des séquences à la base des cortèges de bas niveau.

Enfin, dans le but d'améliorer la visualisation de la plateforme urgonienne, il serait intéressant de créer la grille non pas à partir d'une surface terminale plane, mais à partir de la surface basale. La géométrie de cette surface devrait représenter la paléogéographie du Sud-Est de la France (carte de paléo-profondeur d'eau de la base de la série) mais devrait aussi intégrer les effets de subsidence qui ont eu lieu pendant le dépôt de l'ensemble de la série.



## CONCLUSION

### Un modèle cohérent et réaliste

Le modèle ne prétend pas être une image fidèle de la réalité mais une illustration des conclusions provenant des réflexions menées tout au long de ce projet.

L'ensemble des données acquises pendant cette étude y ont été intégrées. Il s'agit aussi bien de données dures telles que les faciès et les limites de séquences renseignées aux puits, mais aussi et surtout de données abstraites. Sur un total de 6 384 000 cellules, seules 3250 présentent des données d'environnement de dépôt au début de la modélisation. Ce sont les conceptions de conditions de développement ainsi que d'évolution de la paléogéographie générale de la plateforme urgonienne, et de son équivalent en temps dans le bassin, qui permettent de renseigner les 6 380 750 autres cellules.

L'ensemble de ces concepts est intégré à travers les cartes d'épaisseur de série urgonienne, de paléoprophondeur d'eau et d'épaisseur de séries urgoniennes érodées ainsi qu'à travers les paramètres des variogrammes utilisés pour l'extrapolation des différentes variables. A partir de ces éléments, une valeur de facteur commun d'accommodation est attribuée à chaque cellule du modèle. C'est finalement la comparaison de cette valeur avec celle de l'accommodation calculée à partir des courbes de paléoprophondeur d'eau, qui permet de critiquer la véracité du modèle et donc, la valeur des conceptions du géologue.

Cette comparaison est réalisée lors de l'étude des résidus (cf. paragraphe 3.3, p. 229). Dans le modèle présenté ici, 70% des valeurs de facteur commun renseignent plus des deux tiers des valeurs d'accommodation, 86% en renseignent la majorité, et seules 3% présentent des valeurs très éloignées dont l'écart ne pourrait pas être réduit en améliorant les courbes de paléoprophondeur d'eau aux puits. Ces résultats démontrent que les concepts intégrés au fil des étapes de la modélisation sont cohérents avec l'ensemble des données renseignées aux puits.

De plus, la distribution et la géométrie des couches numériques ont été définies afin de représenter au mieux l'architecture interne de la série urgonienne. Il est possible d'observer des terminaisons en onlaps dans les cortèges de bas niveau et dans le cortège transgressif de la séquence A1, des terminaisons en toplap dans les cortèges de haut niveau et des géométries de dépôts en éventail dans les blocs basculés.

Enfin, l'attribution des valeurs d'association de faciès dans l'ensemble des cellules de la grille est également cohérente avec les théories établies. L'évolution spatiale, à l'échelle du bassin comme à l'échelle du bloc, ainsi que l'évolution temporelle, à l'échelle de la séquence, du cortège et de la paraséquence des environnements de dépôts sont représentées.

Ce modèle, dont la géométrie des couches mime l'architecture de la série et dont le remplissage en environnement de dépôt respecte l'ensemble des données et des concepts géologiques intégrés, peut donc être considéré comme une bonne représentation du développement de la plateforme urgonienne.

L'analogie entre l'Urgonien du Sud-Est de la France et les formations carbonatées du Moyen-Orient (Kharai et Shu'aiba), où les plus grandes réserves pétrolières ont été estimées, explique l'intérêt de la réalisation d'un tel modèle. Des valeurs de porosité et de perméabilité peuvent être assignées à chaque cellule à partir des valeurs d'association de faciès (qui peuvent ensuite évoluer si les effets de la diagénèse sont également modélisés). Ainsi, des simulations d'écoulement pourraient être exécutées dans des modèles réservoirs réalistes.

### **Un Urgonien très diversifié**

La diversité de la série urgonienne, tant d'un point de vue stratigraphique que d'un point de vue faciologique, à différentes échelles, est particulièrement mise en évidence dans ce modèle numérique.

Au sud du bassin Vocontien, six blocs, délimités par des failles, basculent pendant le dépôt de la série urgonienne. Des séries d'épaisseur réduites à faciès internes sont déposées en tête de blocs alors que des séries plus épaisses à faciès plus externes comblent les zones plus subsidentes.

Dans les blocs du Gard, d'une séquence à une autre, les faciès représentent des environnements de dépôt de plus en plus internes. Cette évolution est en relation avec la progradation des séquences urgoniennes.

Dans les blocs d'Orgon et de Provence nord, cette évolution est accentuée par le soulèvement relatif de ces blocs. La série urgonienne est principalement composée de faciès de lagon internes et a subi d'importants phénomènes d'érosion.

En comparaison, l'Urgonien des blocs Rhône et Provence sud présente une évolution et des caractères tout autres. L'importante subsidence de ces blocs provoque le dépôt de séries

urgoniennes de plus en plus épaisses et à faciès de plus en plus externes jusqu'à l'ouverture du bassin de la bédoule au sud du secteur d'étude. La géométrie des corps carbonatés, en éventail au Barrémien, passe dans ces blocs à une géométrie en clinoformes, à l'Aptien.

Le secteur du Vercors, au sud du bassin Vocontien, est compartimenté en trois blocs par trois failles sub-méridiennes. Dans la partie nord de ces trois blocs, des zones de haut-fond sont caractérisées par des séries d'épaisseurs réduites. Au nord de ces hauts-fonds, des séries plus épaisses à faciès plus confinés se sont déposées. Vers le sud, les faciès deviennent de plus en plus externes jusqu'au faciès de bassin, au centre du bassin Vocontien.

Dans l'ensemble de ces secteurs, qui correspondent aux lieux de développement de la plateforme urgonienne, seuls les cortèges transgressifs et de haut niveau constituent l'Urgonien. En revanche, sur les bordures de plateforme, les cortèges de bas niveau sont responsables de la majorité de la puissance de la série urgonienne. Les corps carbonatés dessinent des clinoformes et non plus des éventails.

La bordure nord du bassin Vocontien présente des séries plus épaisses que celles de la bordure sud. Cela pourrait être dû, en partie, à une direction des vents dominants vers le sud. Cela impliquerait le transport d'une plus grande quantité de matériel, depuis la plateforme vers la bordure du bassin Vocontien, dans le Vercors par rapport aux secteurs de l'Ardèche et du Vaucluse.

## LEXIQUES

### • Les Objets gOcad :

**Pointset** : un pointset est un ensemble de points sans aucune connexion entre eux. C'est le type d'objet le plus simple. Les pointsets sont principalement utilisés pour importer des données ponctuelles dans gOcad.

**Courbe (curve)** : une courbe est un ensemble de points connectés par des segments. Une courbe peut également contenir plusieurs segments disjoints appelés « parts ». C'est un objet unidimensionnel. Elles sont principalement utilisées pour importer des données linéaires telles que des courbes d'iso-valeur ou des tracés de failles.

**Puits (wells)** : un objet puits contient les informations concernant la localisation de la trajectoire du puits, des données log le long des puits et des marqueurs (markers) définis à différentes altitudes. Les puits sont principalement utilisés comme données d'entrée : les logs représentent les informations collectées aux puits (faciès) et les marqueurs marquent la position des surfaces stratigraphiques.

**Surface** : Une surface est un objet qui contient des points reliés par des triangles. Les surfaces peuvent consister en plusieurs parties déconnectées. Des régions, n'intégrant que certains points peuvent également être définies. C'est un objet bidimensionnel. Les surfaces sont principalement utilisées pour représenter des failles ou des surfaces remarquables telles que les limites de séquences, les surfaces de transgression et les surfaces d'inondation maximum.

**Voxet** : Un voxet est une grille régulière en deux ou trois dimensions comprenant un ensemble de points espacés et orientés d'une manière fixe (boîte à sucre). Des régions n'intégrant que certaines cellules peuvent être définies. Les voxets sont principalement utilisés pour intégrer des images géoréférencées (cartes).

**Sgrid** : Une Sgrid est une grille à géométrie variable en trois dimensions. Les Sgrid peuvent épouser des horizons et être faillées. Des régions n'intégrant que certaines cellules de la grille peuvent être définies. La plupart des Sgrid représentent des grilles stratigraphiques ou réservoirs dans lesquels sont principalement simulés des propriétés réservoirs ou des écoulements.

- **Géostatistique :**

Variogramme : Un variogramme est une fonction mathématique dépendant de la distance au point de donnée. Il permet de définir le rayon (portée) et l'intensité de l'influence d'un point de donnée.

Simulation : Une simulation est une méthode statistique permettant la reconstitution fictive de l'évolution d'un phénomène (Dodge, 1993). A partir du même set de données, plusieurs simulations engendrant des résultats équiprobables peuvent être réalisées. Exemple de résultats de simulation d'un lancé de dé : 1, 2, 3, 4, 5 ou 6.

Krigeage : Nom donné par D.G. Krige, statisticien sud-africain. Méthode d'estimation qui réalise l'interpolation d'une variable en utilisant l'interprétation et la modélisation d'un variogramme. Cette méthode tient compte de la distance entre les données et le point d'estimation.





# Chapitre 6 :

## La paléotectonique du Crétacé inférieur et son influence sur l'Urgonien

### Résumé :

Au Crétacé inférieur, le Sud-Est de la France est d'une part, soumis à la subsidence thermique liée à l'expansion de l'océan Téthys, et d'autre part, est sous l'influence du rifting du futur océan Atlantique Nord et du Golfe de Gascogne.

Plusieurs modèles existent quant aux mouvements de l'Ibérie. Le modèle d'évolution de l'Urgonien, dans un contexte de blocs basculés, proposé dans cette étude, s'accorde au modèle proposé par J. L. Olivet qui implique des phénomènes d'extension pendant la période barrémobédoulienne sur la marge nord de la plaque ibérique.

Cette extension a pu se propager par le jeu de failles de transfert (failles cévenoles des Cévennes, de Nîmes et de la Durance) vers le bassin Vocontien expliquant ainsi la création de blocs basculés sur sa bordure sud. Une zone de transfert pourrait ensuite avoir été activée au sud de la Provence, ce qui aurait permis à l'extension se propageant depuis les bassins Nord-Pyrénéens de développer une subsidence de plus en plus importante jusqu'à la création du bassin de la Bédoule.

## 1 CONTEXTE GÉODYNAMIQUE GÉNÉRAL

Pendant le Jurassique moyen et supérieur (Dogger et Malm), le Bassin du Sud-Est de la France se situe sur la marge passive européenne de la Téthys ligure, qui s'est ouverte en même temps que l'Atlantique central. La cinématique d'ouverture de ces deux espaces océaniques était en principe transmise au sud de la plaque ibérique (Lemoine et al., 1986). Mais, à partir du Tithonien une partie aurait été transférée au nord de la plaque ibérique, dans le futur domaine pyrénéen (Schettino, 2011). Cela aurait entraîné l'arrêt de l'expansion dans la branche sud de la Téthys alpine alors qu'elle aurait continué dans sa branche nord, entre l'Eurasia et l'Adria.

Le rifting de l'Atlantique Nord débute dès le Jurassique terminal (Ziegler, 1999) et les répercussions sont connues dans le Bassin du Sud-Est (Dardeau et al., 1988). Il se poursuit au Crétacé inférieur (notamment à l'Hauterivien) (Olivet, 1996 ; Tucholke et al., 2007). Suite à ce rifting, l'ouverture de l'océan Atlantique Nord entre l'Ibérie et l'Amérique a lieu dès la limite Barrémien-Aptien d'après Sibuet et al., 2004, ou à l'Albien inférieur d'après Olivet, 1996. Elle a pour conséquence attendue un décrochement sénestre le long de la faille Nord-Pyrénéenne. La rotation de la plaque Ibérique accompagne le rifting, puis l'ouverture du Golfe de Gascogne, sans que le calendrier des épisodes de rotation antihoraire et de coulissage sénestre soit précisément établi (Sibuet vs Olivet).

D'après Schettino, 2011, l'expansion de la partie sud de l'Océan Téthys Ligure est stoppée («gelée») à l'Hauterivien en raison du mouvement de l'Ibérie vers l'est. En revanche, celle de la partie nord, entre Adria et Europe, continue. En outre, le plancher océanique de l'Océan Valaisan, dont le rifting a débuté à la limite Jurassique-Crétacé, entame son expansion (Handy et al., 2010). Dans la Téthys alpine, le passage de la divergence à la convergence et le début de la subduction du plancher océanique sous la plaque Adria aurait eu lieu au début du Crétacé supérieur (Handy et al. 2010), alors que l'océan Atlantique Nord continue de s'ouvrir.

En conclusion, pendant le dépôt de la série urgonienne, du Barrémien supérieur à l'Aptien, le Sud-Est de la France est sous l'influence des mouvements de deux plaques majeures : l'Eurasia et l'Afrique et de deux micro-plaques : l'Adria et l'Ibérie. Ce secteur a subi d'une part la subsidence post-rift consécutive à l'ouverture de l'océan téthysien, et d'autre part, l'influence de la fin du rifting du futur océan Atlantique Nord et du Golfe de Gascogne.

Les Figure 6-1, p. 247 et Figure 6-2, p. 247, d'après Schettino, 2011, et Handy et al.,

2010, illustrent la paléogéographie du Crétacé inférieur. La présence d'un océan crétacé entre la Provence et le bloc corso-sarde sur la Figure 6-1, p. 247 reste un sujet controversé étant donné qu'aucune trace de croûte océanique de cette âge n'a été retrouvée dans ce secteur.

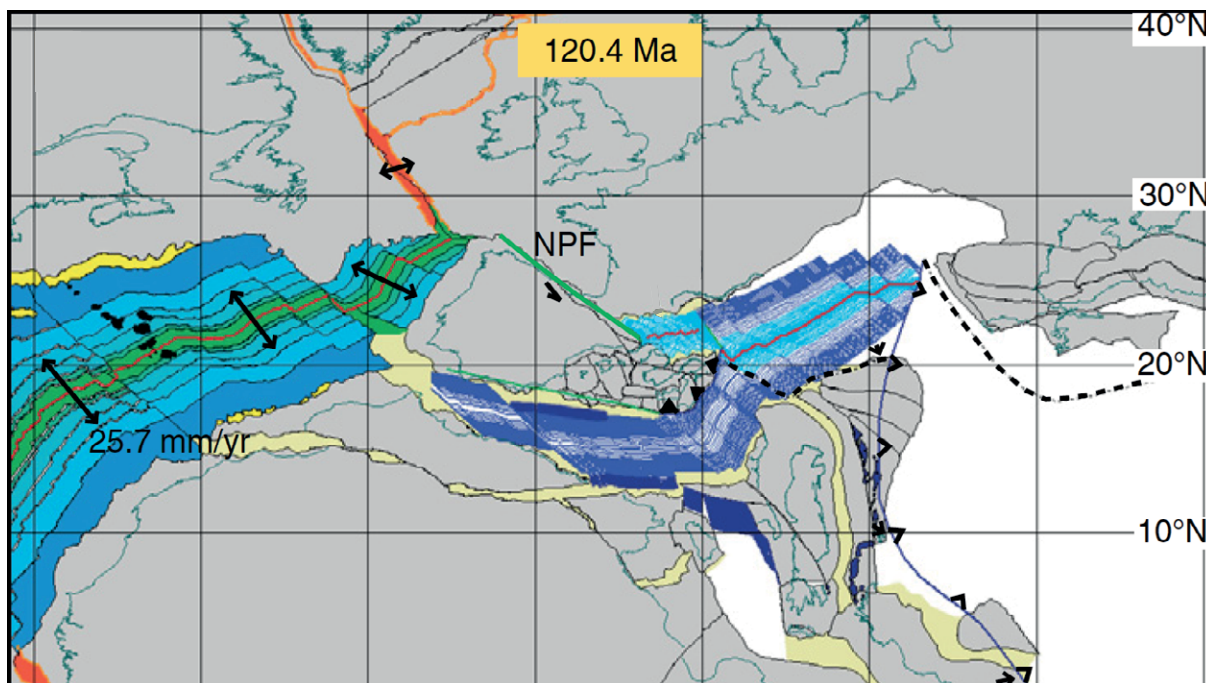


Figure 6-1 : Reconstruction paléogéographique au niveau de l'anomalie magnétique M0 (limite Barrémien-Aptien). NPF correspond à la faille Nord Pyrénéenne. (Schettino *et al.*, 2011)

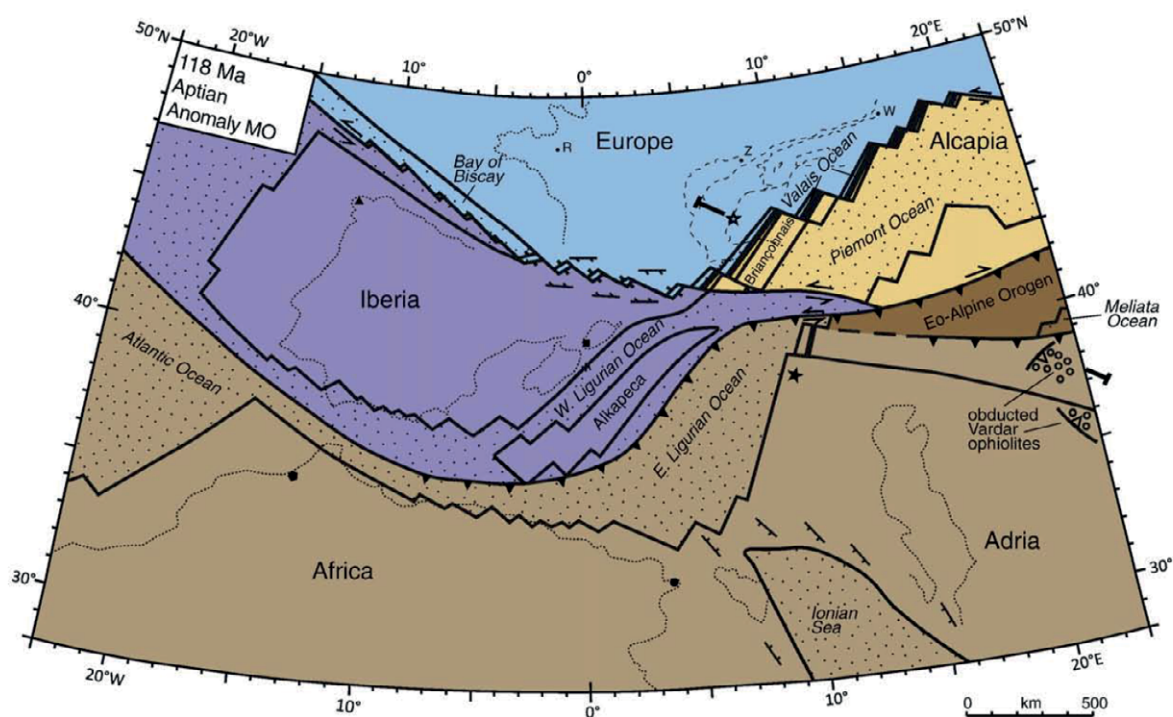


Figure 6-2 : Reconstruction paléogéographique au niveau de l'anomalie M0 (limite Barrémien-Aptien). (Handy *et al.*, 2010)

## 2 LA ROTATION DE LA PLAQUE IBÉRIQUE

L'ensemble des auteurs s'accordent pour dire que le déplacement de la plaque ibérique est lié à l'ouverture du Golfe de Gascogne et a engendré la formation de bassins entre le nord de l'Espagne et le Sud-Ouest de la France (Parentis, Mauleon, Cantabrian...). En revanche, des interprétations divergentes existent quant à l'amplitude de la rotation de la plaque ibérique, du mouvement sénestre qui l'a probablement précédé, et quant à l'âge de ce(s) phénomène(s).

D'après le modèle d'Olivet, 1996, une première phase distensive barrémo-aptienne d'orientation NW-SE aurait précédé le mouvement décrochant sénestre. L'amplitude de la phase distensive n'est pas contrainte par des anomalies magnétiques, mais il l'estime au minimum à 150 km d'ouverture entre l'Eurasia et l'Ibérie avant le début de la convergence. En revanche, l'amplitude du mouvement décrochant sénestre, qui aurait eu lieu entre environ 107 et 90 Ma le long de la marge nord de la plaque ibérique, serait d'environ 100 km. La Figure 6-3, p. 249 représente la position des plaques au niveau de l'anomalie M0 selon Olivet, 1996.

Pour Sibuet et al., 2004, la première phase distensive entre l'Eurasia et l'Ibérie aurait débuté bien plus tôt, il y a environ 156 Ma (Kimmeridgien) et aurait eu une amplitude de 350 km. Cette extension d'orientation nord-sud qui se serait poursuivie jusqu'à l'Aptien aurait provoqué le rifting, puis l'ouverture du Golfe de Gascogne. Ce modèle implique la connection à l'anomalie M0 entre le Golfe de Gascogne et une branche néo-téthysienne qui désolidarise totalement la plaque ibérique de l'Eurasia, branche dont on devrait retrouver la trace sous l'ensemble des Pyrénées actuelles (cf. Figure 6-4, p. 250). Toujours d'après Sibuet et al., 2004, à partir de l'anomalie M0 (peut être même à partir du Barrémien supérieur) et jusqu'au Campanien, l'ouverture du Golfe de Gascogne se traduirait par un mouvement de rotation antihoraire de la plaque ibérique par rapport à l'Eurasia. Le pôle de cette rotation serait situé au sud-est du Golfe de Gascogne, ce qui impliquerait une importante convergence avec subduction de croûte océanique dans les Pyrénées orientales.

En revanche, Z. Gong, à partir de données paléomagnétiques, propose que la rotation de l'Ibérie soit restreinte à l'Aptien (Gong et al., 2008).

Enfin, S. Jammes, d'après ses travaux dans l'ouest des Pyrénées, arrive à la conclusion qu'un mouvement en décrochement sénestre entre l'Eurasia et l'Ibérie a précédé la rotation antihoraire de l'Ibérie (Jammes et al., 2009). Ce décrochement antérieur à l'ouverture du Golfe de Gascogne









### 3 LES CONSÉQUENCES CONNUES DE LA GÉODYNAMIQUE CRÉTACÉE

Plusieurs auteurs ont mis en relation leurs observations dans le Sud-Est de la France avec la géodynamique de l'Atlantique. H. Arnaud, met en évidence dans le Vercors une accélération de la subsidence au Barrémien et fait l'hypothèse qu'elle «pourrait être une conséquence de l'ouverture d'une partie de l'Atlantique» (Arnaud, 1988, p. 725). Dans le bassin du Sud-Est de la France, G. Dardeau et ses co-auteurs décrivent le basculement de blocs pendant le Callovien et l'Oxfordien et soulignent que cette période coïncide avec la fin du rifting téthysien et le début du rifting dans l'Atlantique Nord (Dardeau et al., 1988). De Graciansky et Lemoine (1988) proposent que la phase de rifting dans le domaine atlantique ait provoqué de l'extension et la création de blocs basculés dans le Sud des Alpes occidentales, la Provence et les Alpes Maritimes pendant tout le crétacé inférieur.

Dans les massifs du Ventoux et de la Montagne de Lure, Hibschi considère l'événement barrémien transtensif ou extensif NW-SE à ENE-WSW qu'il observe comme une conséquence de la rotation antihoraire du bloc ibérique (Hibschi, 1992). La limite plate-forme-bassin actuellement représentée par l'axe Ventoux-Lure aurait pu jouer en transpression dès l'Albien en occasionnant la resédimentation de blocs issus des escarpements barrémo-bédouliens (Montenat et al., 2004). La mobilité de la plaque ibérique a pu se faire sentir encore plus à l'est, jusque dans le Briançonnais dès le Jurassique supérieur (Claudel et al., 1997).

Dans les Pyrénées, de nombreuses études ont été réalisées sur l'extension, la subsidence et de remplissage des bassins crétacés.

De nombreux auteurs (Souquet et al. (1985), Canérot & Delavaux (1986), Ducasse et al. (1986), Rat (1988) et Canérot (1989) ont mis en évidence dans les Pyrénées occidentales le développement de bassins en demi-graben sur la marge nord de la plaque ibérique pendant le Crétacé inférieur, et peut-être même dès le Jurassique supérieur (James et al., 1996 ; Canérot, 1991). D'après Canérot, le régime extensif responsable de la création de ces bassins serait dû au déplacement de la plaque ibérique vers le sud-ouest et serait orienté nord-est - sud-ouest. Pour Bourrouilh et al. (1995), l'extension N-S se développe dans un contexte de transtension lié au coulissage sénestre de la plaque ibérique.

Dans la région de Mauléon et plus à l'ouest dans le massif des Arbailles (Pyrénées occidentales), les calcaires à faciès Urgonien ont été relativement peu étudiés du point de vue stra-

tigraphique et sédimentologique. Leur dépôt apparaît contrôlé à la fois par l'eustatisme et par la tectonique distensive (Lenoble et Canérot, 1993 ; Canérot, 1989). S. Jammes (2009) interprète cette sédimentation syntectonique de calcaires à faciès urgonien dans un contexte transtensif à dominante sénestre du Jurassique terminal à l'Aptien basal, supposé lié au déplacement de l'Ibérie vers le sud-est, puis dans un contexte distensif de l'Aptien terminal à l'Albien, en lien avec la rotation de l'Ibérie et l'ouverture du Golfe de Gascogne.

Dans le domaine cantabrique plus à l'ouest, Agirrezabala & Garcia-Mondéjar (2007) attribuent des épisodes d'érosion et de karstification, à l'Aptien, à un contrôle tectonique de type transtensif. Toutefois, les épisodes d'érosion et d'altération continentale (bauxitisation) se seraient répartis de la fin du Jurassique à l'Aptien dans les Pyrénées occidentales et ne seraient que l'expression des mouvements verticaux liés au rifting sur la marge nord de la plaque ibérique d'après Combes et al. (1998).

Enfin, à l'est des Pyrénées, Gong et al. (2009) mettent en évidence une extension d'orientation NE-SW dans le bassin d'Organyà, dont l'évolution sédimentaire et la subsidence ont été documentées par Bernaus et al. (2003). Pour eux, cette distension aptienne coïnciderait avec la période de rotation antihoraire de l'Ibérie (Gong et al., 2009).

## 4 INFLUENCE POSSIBLE SUR LA GÉOMÉTRIE URGONIENNE

Même s'il existe différentes hypothèses concernant le mouvement de l'Ibérie, toutes intègrent une composante d'extension pendant la période barrémo-aptienne. Dans les pyrénées, cette extension s'est principalement traduite par la formation de bassins en demi-graben comme discuté précédemment. Dans le Sud-Est de la France, l'influence du rifting de l'Atlantique Nord et du Golfe de Gascogne est suggérée depuis de nombreuses années. Le lien entre l'évolution de plusieurs secteurs du Sud-Est de la France avec celle des Pyrénées a également été mis en évidence par différents auteurs.

L'étude de la plateforme urgonienne dans le Sud-Est de la France aboutit à proposer un système en blocs basculés, qui s'inscrit donc bien dans le contexte géodynamique régional décrit, tant dans le Sud-Est de la France et l'avant-pays alpin, que dans la domaine pyrénéen.

Le contrôle distensif de la sédimentation carbonatée mis en évidence dans ce travail autour du bassin Vocontien, en particulier au nord du Gard, en Ardèche et dans le Vaucluse, peut donc être considéré comme une prolongation du système extensif mis en évidence dans les bassins Nord-Pyrénéens. L'orientation prédominante WNW-ESE des blocs basculés correspondrait bien à la direction d'extension du rifting crétacé sur la marge nord-ibérique. Cette extension aurait pu être propagée dans la partie occidentale du Bassin du Sud-Est grâce à des failles de transfert de direction NE-SW héritées du socle hercynien et bien connues (faille des Cévennes, failles de Nîmes, faille de la Durance). Un tel mécanisme de transfert sur des failles de direction « cévenole » a été proposé dans le domaine Pyrénéen (Debroas et al., 1978 ; Combes et al., 1989 ; Canerot, 1991) ainsi qu'à la jonction avec les bassins du domaine cantabrique (Rat, 1988 ; Mathey et al., 1999). Le jeu de ces failles de transfert a permis le fonctionnement de blocs basculés de direction d'environ N110° dans le Gard, le Vaucluse et la Provence, et la différenciation de blocs dans le Vercors (cf. Figure 6-5, p. 254). Ces basculements sont détectés par la subsidence différentielle entre séries réduites à faciès interne en tête de bloc, qui subiront une érosion plus importante lors des bas niveaux, et les séries plus épaisses à faciès plus externes déposées dans les demi-grabens.

A partir de l'Aptien basal, une zone de transfert pourrait avoir été activée au sud de la Provence, ce qui permettrait à l'extension se propageant depuis les bassins Nord-Pyrénéens de développer une subsidence de plus en plus importante dans le secteur du bassin de la Bédoule.

Au même moment, la surélévation des secteurs d'Orgon et du nord de la Provence pourrait correspondre à un phénomène d'épaulement de rift en bordure du bassin Vocontien.

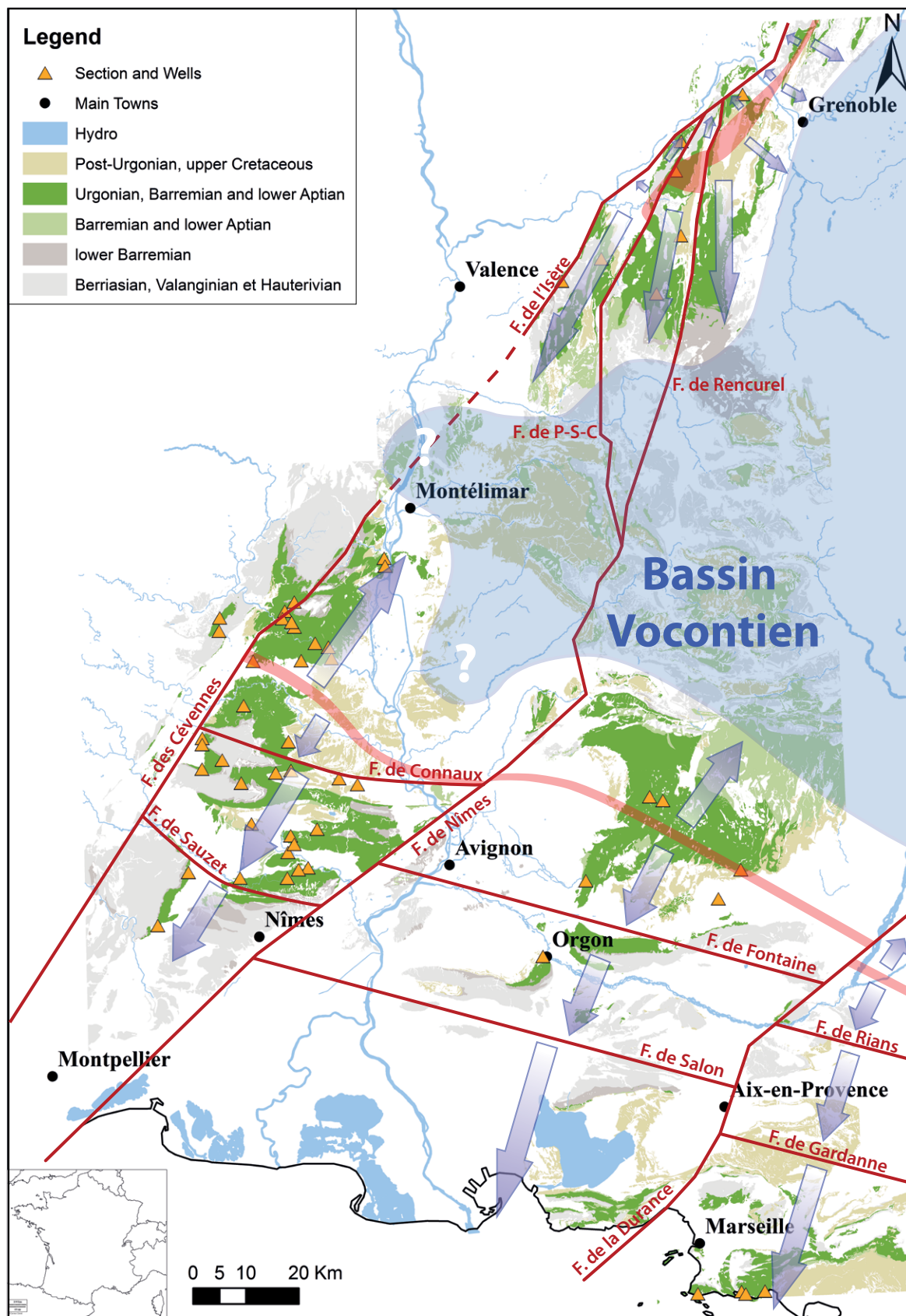


Figure 6-5 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien du Sud-Est de la France. Les flèches bleues représentent les directions d'épaulement de la série, les zones rouges représentent les zones de hauts fonds.

## CONCLUSION

Le dépôt de la série urgonienne dans le Sud-Est de la France au Barrémien supérieur et à l'Aptien inférieur a été soumis à l'influence de la dynamique de plusieurs plaques. Sur la partie sud-occidentale du continent européen, on observe (1) les effets de l'expansion de l'océan Téthys, avec une subsidence thermique de la marge qui peut expliquer une partie de l'accommodation à cette époque ; et (2) les prémices de la désolidarisation, entre l'Ibérie et l'Amérique du Nord d'une part (rifting de l'Atlantique Nord), qui pourrait induire un début de coulissage sénestre Ibérie-Europe, et d'autre part, le rifting précédant l'ouverture du Golfe de Gascogne provoquant une distension dans tous les domaines situés au nord de la plaque ibérique et de ses dépendances orientales, dont la Provence.

On attend donc une composante de subsidence tectonique qui a certainement influencé le développement de la plateforme urgonienne. Cette extension, dont l'orientation serait comprise entre NS et NE-SO suivant les modèles, permet d'expliquer la formation de blocs basculés WNW-ESE dans les secteurs du Gard, du Vaucluse et de la Provence. L'orientation différente des blocs dans le Vercors (NE-SO) indiquerait un plus fort contrôle de l'héritage hercynien.

Ce sont donc les phénomènes tectoniques liés au début de la mobilité de l'ensemble Ibérie-Corse-Sardaigne-Provence (et Briançonnais ?) qui vont principalement contrôler l'accommodation sur les plateformes et les bordures des bassins Vocontien et Bédoulien (subsidence tectonique et soulèvement des épaulements). Il est toutefois possible que l'évolution thermique de la marge NW de l'océan Téthys ligure, qui était encore en expansion, ait accentué la subsidence sur l'ensemble de ces plateformes (subsidence thermique).





# Chapitre 7:

## Synthèse et conclusions

## 1 OBJECTIFS

Cette étude, portant sur l'Urgonien du Sud-Est de la France, a permis de proposer un modèle d'évolution de la plateforme urgonienne pendant le Barrémien terminal et l'Aptien basal. La diversité de la formation urgonienne a été mise en évidence et peut être expliquée par le rôle des différents facteurs responsable de son organisation.

## 2 MÉTHODE

A l'occasion de nombreuses missions sur le terrain, des observations (géométrie des bancs, macrofaune, figures sédimentaires et diagénétiques, paysages, ...) ont été réalisées, et un grand nombre de données (échantillons et cuttings,) ont été récoltées. 52 coupes et puits, répartis sur l'ensemble des cinq secteurs du Sud-Est de la France (Vercors, Ardèche, Gard, Vaucluse et Provence) ont ainsi été échantillonnés.

Un modèle de faciès et une charte biostratigraphique (principalement basée sur les Orbitolinidés) ont été spécifiquement développés afin de caractériser au mieux les séquences urgoniennes. Associés aux observations de terrain, ces outils ont permis le découpage stratigraphique de l'Urgonien le long de chaque coupe et puits.

Des analyses géochimiques (isotopes stables :  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  et concentrations en phosphore) réalisées sur 6 coupes clés réparties sur les cinq secteurs du Sud-Est de la France précise la stratigraphie de l'Urgonien et valide les corrélations. Sur l'ensemble des secteurs, la plateforme urgonienne s'est majoritairement développée au Barrémien supérieur et à la base de l'Aptien. Sa mise en place est datée de la base du Barrémien supérieur, hormis en Provence où les premiers faciès urgoniens à rudistes se sont développés dès l'Hauterivien.

Dans un premier temps, les séries urgoniennes, détaillées le long des coupes et puits, ont été corrélées le long de différents transects afin de déterminer l'organisation (direction d'épaississement, répartition des faciès...) de l'Urgonien, par secteur.

Dans un second temps, la géométrie et la paléogéographie de la plateforme urgonienne, ainsi que son évolution cortège par cortège, ont été interprétées à l'échelle du Sud-Est de la France en se basant sur l'ensemble des données acquises (épaisseurs de cortèges, répartition des faciès, évidence d'érosion, ...) et disponibles dans la bibliographie.

### 3 INTERPRÉTATIONS

Ces corrélations et interprétations ont permis de mettre en évidence le jeu de plusieurs failles synsédimentaires : 1) des failles cévenoles d'orientation N 10° à N30° (faille des Cévennes, faille de Nîmes, faille de la Durance, faille de l'Isère, faille de Presles-Saillant-Condorcet et faille de Rencurel) ainsi que 2) des failles non représentées sur les cartes géologiques, probablement barrémiennes, d'orientation N 110° (faille de Connaux, faille de Sauzet, faille de Fontaine, faille de Salon, faille de Rians et faille de Gardanne).

Le premier système de failles délimite trois blocs dans le massif du Vercors traversé par un alignement de haut-fond, qui sépare une zone d'affaissement le long de la faille de l'Isère, du reste de la plateforme urgonienne développée sur la bordure nord du bassin Vocontien. Dans les secteurs de l'Ardèche et du Vaucluse, c'est le second système qui prédomine. Une zone de haut-fond sépare également une zone affaissée, par le jeu de failles d'orientation N 110°, de la bordure sud du bassin Vocontien. Plus au sud, dans les secteurs du Gard, des Alpilles, du Luberon, de la Camargue et de la Provence, l'intérieur de la plateforme est divisé en six blocs qui ont basculé pendant le dépôt de la série urgonienne. L'intensité des mouvements de blocs provoqués par le jeu des failles synsédimentaires a évolué dans le temps, en réponse au contexte géodynamique.

Au Barrémien terminal et Aptien basal, le Sud-Est de la France est soumis à l'effet de l'expansion de l'océan Téthys, engendrant une subsidence thermique de la marge pouvant expliquer une partie de l'accommodation, ainsi qu'à l'effet du rifting de l'Atlantique Nord et du Golfe de Gascogne provoquant une distension au nord de la plaque ibérique.

La propagation de cette extension, d'orientation comprise entre nord-sud et nord-est – sud-ouest en fonction des modèles, vers le bassin Vocontien à travers les failles de transfert cévenoles (faille des Cévennes, faille de Nîmes et faille de la Durance) est à l'origine de la formation de blocs basculés. A partir de la deuxième séquence du Barrémien supérieur, une zone de transfert a été activée au sud du secteur d'étude engendrant une subsidence de plus en plus importante jusqu'à création du bassin Bédoulien. Simultanément, le soulèvement des secteurs du Lubéron, des Alpilles et de la Provence nord peut être interprété comme un phénomène d'épaulement de rift.

## 4 L'ÉVOLUTION DE LA PLATEFORME URGONIENNE

### 4.1 LA SÉQUENCE BA3

A la base du Barrémien supérieur, la plateforme urgonienne se développe sur les bordures du bassin Vocontien. Le régime extensif lié au rifting qui a lieu sur la marge nord-ibérique, se propage vers le nord-est à l'aide des failles cévenoles (faille des Cévennes, faille de Nîmes, faille de la Durance). La subsidence est alors concentrée au niveau du bassin Vocontien.

Le jeu des failles de transfert a engendré le basculement de blocs d'orientation N110° dans le Gard, le Vaucluse et la Provence et l'individualisation de trois blocs dans le Vercors.

A l'échelle du Sud-Est de la France, la position du bassin Vocontien contrôle l'organisation de la plateforme urgonienne. En s'éloignant de ce dernier, les environnements de dépôts deviennent de plus en plus internes et les épaisseurs de séries urgoniennes diminuent.

En revanche, à une échelle plus réduite, la direction d'évolution de la série urgonienne est inversée. Sur la bordure sud du bassin Vocontien, le basculement des blocs contrôle la géométrie et la répartition des environnements de dépôt à l'échelle locale. Depuis les têtes de blocs vers le sud-ouest, l'épaisseur de l'Urgonien augmente et les faciès correspondent à des environnements de plus en plus externes.

De la même manière, sur la bordure nord du bassin Vocontien, deux directions d'organisation peuvent être distinguées à deux échelles d'espace différentes. A l'échelle régionale, la position du bassin Vocontien implique une augmentation des épaisseurs et le dépôt de faciès de plus en plus externes vers l'est-sud-est. Néanmoins, à l'intérieur des blocs qui divisent le Vercors, l'évolution des épaisseurs et des environnements de dépôts est d'avantage orientée nord-sud.

### 4.2 LA SÉQUENCE BA4

A la base de cette séquence, l'organisation de la plateforme urgonienne est identique à celle de la séquence Ba3.

Lors du dépôt du cortège de haut niveau de la séquence Ba4, le régime extensif lié au rifting de la marge nord ibérique se propage partiellement au sud du secteur d'étude. Même si la subsidence reste maximale au niveau du bassin Vocontien, cette modification du régime des contraintes implique une nouvelle organisation de la plateforme urgonienne, à l'échelle régio-

nale, dans les secteurs du Vaucluse et de la Provence.

Cette nouvelle zone de transfert, située au sud du secteur d'étude amplifie le jeu des failles qui provoquent le basculement des blocs situés le plus au sud (bloc Rhône et bloc Provence sud. En outre, les blocs situés au nord de ces derniers et au sud du bassin Vocontien (bloc d'Orgon et de Provence nord (cf. Figure 4-31, p. 157) se trouvent surélevés. Ils forment l'équivalent d'un horst entre les blocs plus subsidents situés au nord et au sud. Cette surélévation peut être la conséquence d'un phénomène d'épaulement de rift.

Le secteur du Vercors n'est pas affecté par ce changement de régime des contraintes. L'organisation de la plateforme urgonienne est identique à celle de la séquence Ba3. Néanmoins, tout comme sur la bordure sud du bassin Vocontien, les corps carbonatés de cette séquence sont progradants par rapport à ceux de la séquence Ba3.

### **4.3 LA SÉQUENCE BA5**

La propagation du régime extensif au sud du secteur d'étude, initiée au sommet de la séquence Ba4, s'amplifie lors du dépôt de la séquence Ba5. L'organisation générale de la plateforme urgonienne lors de la sédimentation du cortège de haut niveau de la séquence Ba4 est accentuée au moment du dépôt de la séquence Ba5.

La subsidence qui affecte les blocs Rhône et Provence sud est de plus en plus importante. Cela implique le dépôt de séries urgoniennes très épaisses à faciès externes au pied de ces blocs. Le soulèvement des blocs d'Orgon et de Provence nord s'amplifie également. Ils sont alors le lieu de sédimentation d'Urgonien à faciès très internes dont l'épaisseur est réduite par rapport aux séries du Gard.

Au niveau des bordures de plateforme, l'Urgonien prograde toujours en direction du bassin Vocontien.

### **4.4 LA SÉQUENCE A1**

A la base de l'Aptien, le régime extensif propagé depuis la marge nord de la plaque ibérique vers le sud du secteur d'étude entraîne finalement la création d'un bassin dans le secteur de la Provence et de la Camargue.

La plateforme urgonienne du Sud-Est de la France s'organise alors sur les bordures des



bassins Vocontien et Bédoulien.

Dans les blocs Provence sud et Rhône, l'Urgonien s'organise alors en clinoformes et des faciès de bassin apparaissent. Un cortège de bas niveau se développe.

Les blocs d'Orgon et de Provence nord sont toujours surélevés par rapport aux blocs adjacents.

Sur les bordures du bassin Vocontien, la progradation de la plateforme urgonienne est particulièrement importante. Ce saut de progradation peut être relié au transfert du régime extensif depuis le bassin Vocontien vers le bassin Bédoulien, ce qui entraînerait une diminution de la subsidence dans le bassin Vocontien.

## **5 LES FACTEURS RESPONSABLES DE L'ORGANISATION DE LA PLATEFORME URGONIENNE**

L'étude de l'Urgonien du Sud-Est de la France a permis de mettre en évidence l'hétérogénéité, tant géométrique que faciologique, de cette formation carbonatée. Le modèle numérique en trois dimensions en est l'illustration (cf. chapitre 5, p. 234). Dans ce paragraphe, afin d'expliquer cette hétérogénéité, les différents facteurs responsables de l'organisation de la série urgonienne vont être décrits par secteur.

### **5.1 LE GARD**

Le secteur du Gard est situé entre la faille des Cévennes et la faille de Nîmes qui sont deux failles cévenoles ayant servi de failles de transfert, permettant ainsi la propagation du régime extensif lié au rifting crétacé sur la marge nord de l'Ibérie. Le jeu de ces failles a provoqué le basculement de blocs d'orientation N110° dans lesquels la plateforme urgonienne s'est développée sous forme d'éventail.

L'épaisseur de série urgonienne érodée au sommet de chaque séquence augmente depuis la base de la série vers son sommet en conséquence de la diminution générale du niveau moyen des mers au Barrémien supérieur et à la base de l'Aptien.

La géométrie de l'Urgonien du Gard est donc principalement contrôlée par la subsidence tectonique induite par le basculement des blocs. Elle influence également la répartition des environnements de dépôt : internes en tête de blocs, et plus externes en pied de blocs. Néanmoins, l'évolution des environnements de dépôt, de plus en plus internes, ainsi que l'érosion de plus en plus importante au sommet des séquences démontrent que l'évolution générale de la plateforme urgonienne reste essentiellement contrôlée par l'eustatisme.

### **5.2 LA CAMARGUE ET LE SUD DE LA PROVENCE**

Ces régions sont les plus méridionales du secteur d'étude. Pour les mêmes raisons paléostructurales que celles proposées à propos de la structure du Gard, ce secteur est divisé en blocs basculés délimités par des failles d'orientation N 110° et appuyés sur les failles de transfert d'orientation cévenole de Nîmes et de la Durance.

Même si la structure est comparable, l'évolution de l'Urgonien de ce secteur est tout à fait

contraire à celle du secteur du Gard. Le passage de la propagation du régime extensif au sud du secteur d'étude, pendant le dépôt de la deuxième séquence du Barrémien supérieur, a dicté l'évolution de l'Urgonien de ce secteur. Cela a induit une subsidence de plus en plus importante, augmentant ainsi l'espace disponible à la sédimentation. Pendant le Barrémien supérieur, l'épaisseur de la série urgonienne, déposée en éventail, augmente tandis que les environnements de dépôts deviennent de plus en plus externes. A l'Aptien, la subsidence est telle qu'elle permet la création d'un bassin au sud du secteur d'étude nommé bassin Bédoulien. Les sédiments s'organisent alors en clinoformes et des faciès de bassin apparaissent.

Le sommet des séquences du Barrémien supérieur ont de moins en moins été affectés par des phénomènes d'érosion jusqu'à ce que la totalité de la première séquence aptienne soit conservée.

Dans ce secteur, aucune preuve de la diminution du niveau moyen des mers n'est retrouvée. La géométrie de l'Urgonien, la répartition et l'évolution des environnements de dépôts ainsi que la diminution de l'effet de l'érosion sont entièrement dues à la subsidence tectonique qui affecte ce secteur, qui est donc plus marquée que dans le Gard.

### **5.3 LES ALPILLES, LE LUBERON ET LE NORD DE LA PROVENCE**

Ces régions, situées au nord de celles faisant l'objet du paragraphe précédant, correspondent à deux blocs basculés, eux aussi délimités par des failles d'orientations N 110° et par les failles cévenoles de Nîmes et de la Durance.

La géométrie, ainsi que la répartition des environnements de dépôt sont donc contrôlées par le jeu de ces failles provoquant le mouvement des blocs dans lesquels la plateforme urgonienne s'est développée.

Tout comme dans la région du Gard, la série urgonienne présente des faciès de plus en plus internes depuis la base de la série vers le sommet. De même, au Barrémien supérieur, l'épaisseur de série érodée au sommet des séquences augmente vers le haut de la série.

En revanche, l'amplitude de ces évolutions régressives est bien plus importante dans ce secteur que dans le secteur du Gard. Les faciès y sont toujours plus internes, particulièrement au sommet de la série urgonienne où seuls des faciès de lagon interne et des faciès de plage se déposent. Au sommet du Barrémien, l'épaisseur d'Urgonien érodé en tête des blocs de ce secteur

est deux fois plus important qu'en tête des blocs du Gard.

À l'Aptien, la distension, à l'origine de l'ouverture du bassin Bédoulien au sud du secteur d'étude, engendre de la subsidence jusque dans les secteurs du Lubéron, des Alpilles et du nord de la Provence. C'est pourquoi l'épaisseur d'Urgonien érodé au sommet de la séquence aptienne est moins importante qu'au sommet de la dernière séquence barrémienne.

Dans ce secteur, la géométrie de l'Urgonien ainsi que la répartition des environnements de dépôt sont contrôlées par la subsidence tectonique induite par le basculement des blocs.

En revanche, la diminution du niveau moyen des mers est responsable, en partie, de l'évolution des environnements de dépôt de plus en plus internes et de la quantité croissante d'Urgonien érodé en sommet de séquence. Au Barrémien, l'élévation de ce secteur, interprétée comme un épaulement de rift, réduit encore l'espace disponible. Au contraire, à l'Aptien, le régime tectonique provoque la subsidence de ce secteur.

#### **5.4 LA BORDURE SUD DU BASSIN VOCONTIEN (ARDÈCHE ET VAUCLUSE)**

Cette région est délimitée au sud par les failles N 110° délimitant les blocs basculés des régions décrites précédemment. Le jeu de ces failles normales a engendré un phénomène de roll-over sur la bordure sud du bassin Vocontien. Aux abords de ces failles, la série urgonienne est relativement épaisse et s'amincit vers le nord, au niveau d'une zone de haut-fond où l'Urgonien présente les faciès les plus internes. Au nord de cette zone de haut-fond, l'Urgonien s'organise en clinoformes.

Dans ce secteur, la géométrie de la formation urgonienne ainsi que la répartition des faciès sont régies par différents facteurs :

- La subsidence tectonique induite par le jeu des failles N 110° entraîne une sédimentation en éventail au sud, puis une culmination et le développement de clinoformes vers le bassin plus au nord, en liaison avec le roll-over.
- La paléogéographie à la fin du Barrémien inférieur offre un espace disponible à la sédimentation plus important dans le Vaucluse qu'en Ardèche où l'épaisseur d'Urgonien est moindre et les faciès plus internes.
- L'eustatisme provoque la diminution de l'espace disponible et par conséquent, la progra-

dation de la plateforme urgonienne ainsi que l'augmentation des épaisseurs de séries érodées au sommet des séquences.

## 5.5 LE VERCORS

Le Vercors est le seul secteur situé sur la bordure nord du bassin Vocontien. Il est divisé en trois blocs délimités par des failles subméridiennes : les failles de Presles-Saillant-Condorcet et de Rencurel qui se branchent, au nord, à la faille de l'Isère.

Le jeu de cette dernière provoque un affaissement et donc le dépôt d'une série urgonienne plus épaisse aux abords de cette faille. Cette zone d'affaissement est séparée du reste de la plateforme urgonienne par une zone de haut-fond d'orientation similaire à celle de la faille des Cévennes.

La paléogéographie du bassin Vocontien, qui s'ouvre vers l'est induit une augmentation de l'espace disponible à la sédimentation d'ouest en est, modulée par la présence des failles délimitant les trois blocs qui divisent le secteur du Vercors.

Sur la bordure de la plateforme, les dépôts s'organisent en clinoformes qui progradent à travers le dépôt des quatre séquences qui composent cette série, en réponse à la diminution du niveau moyen des mers.

Le sommet de la première séquence du Barrémien supérieur a été suffisamment émergé pour provoquer des phénomènes de karstification et l'érosion d'une importante épaisseur de série urgonienne. A partir de la deuxième séquence (moins érodée que la première), l'épaisseur d'Urgonien érodé est de plus en plus importante.

Une érosion particulièrement importante au sommet de la première séquence urgonienne n'ayant pas été mise en évidence dans les autres secteurs du Sud-Est de la France, il est probable que des mouvements tectoniques soient à l'origine de ce phénomène.

La géométrie et la répartition des faciès de l'Urgonien du Vercors sont donc contrôlées par le jeu des trois failles subméridiennes et par la paléogéographie du bassin Vocontien. En revanche, l'évolution des environnements de dépôt est dirigée par l'eustatisme.

## 6 CONCLUSIONS

La géométrie de la formation urgonienne ainsi que la répartition et l'évolution des environnements de dépôts sur la bordure du bassin Vocontien ont été contrôlées par différents facteurs : la paléogéographie, les mouvements tectoniques et l'eustatisme. En fonction des secteurs considérés, certains facteurs ont été plus ou moins prédominants.

La géométrie et la répartition des faciès constituant la série urgonienne du Gard, de la Camargue, des Alpilles, du Luberon et de la Provence (nord et sud), sont entièrement contrôlées par la subsidence tectonique induite par le jeu des failles, responsables du basculement des blocs. Alors qu'en Ardèche, dans le Vaucluse et le Vercors, la géométrie et la répartition des faciès sont principalement influencées par la paléogéographie, et par la tectonique dans une moindre mesure.

En terme d'évolution des environnements de dépôts depuis la base du Barrémien supérieur jusqu'au sommet de la première séquence aptienne, l'eustatisme reste le facteur prépondérant dans la majorité des secteurs du Sud-Est de la France. Dans les Alpilles, le Lubéron et le nord de la Provence, les effets de l'eustatisme sont accentués par le soulèvement d'origine tectonique de ces régions. Au contraire, en Camargue et dans le sud de la Provence, la subsidence tectonique s'y oppose et supprime l'effet de la diminution du niveau moyen des mers.

Le tableau ci-dessous résume les facteurs et leurs influences sur l'organisation de la plateforme urgonienne dans les différents secteurs du Sud-Est de la France.

	Géométrie	Répartition des faciès	Évolution des faciès
Gard	Tectonique	Tectonique	Eustatisme
Camargue et Provence sud	Tectonique	Tectonique	Tectonique
Alpilles, Luberon et Provence nord	Tectonique	Tectonique	Eustatisme et Tectonique
Ardèche et Vaucluse	Paléogéographie et Tectonique	Paléogéographie et Tectonique	Eustatisme
Vercors	Paléogéographie et Tectonique	Paléogéographie et Tectonique	Eustatisme

Tableau 7-1 : Tableau résumant les facteurs ayant influencé l'organisation de la plateforme urgonienne dans les différents secteurs du Sud-Est de la France.



La paléogéographie, qui détermine la position des bordures de plateforme sur lesquels vont se déposer les cortèges de bas niveau, ainsi que l'eustatisme, qui contrôle la progradation de la plateforme urgonienne vers le bassin Vocontien, sont deux facteurs qui influencent le développement général de la plateforme.

Néanmoins, le facteur principalement responsable de l'organisation de la plateforme urgonienne est la tectonique. Ce sont les phénomènes de subsidence tectonique (à l'échelle des blocs basculés ou au niveau du bassin de la Bédoule à plus grande échelle) ainsi que le soulèvement associé à des phénomènes d'épaulement de rift (surélévation des régions des Alpilles, du Lubéron et de la Provence nord) qui sont à l'origine de l'importante diversité de la formation urgonienne.

La tectonique a donc joué un rôle prépondérant dans l'organisation de l'Urgonien du Sud-Est de la France. Les conditions de développement de la plateforme urgonienne sont donc directement reliées au régime distensif qui affecte le Sud-Est de la France au Barrémien et à l'Aptien.

L'élévation des secteurs des Alpilles, du Lubéron et de la Provence nord, lieu du futur bombement Durancien, ainsi que la tendance générale à une amplification des phénomènes d'érosion sur une grande partie du Sud-Est de la France, peuvent être interprétées de deux manières.

D'après Peyaud *et al.*, 2005, des phénomènes d'érosion importants ont affecté le sud du Massif Central au «Crétacé moyen». Il propose que ces phénomènes soient reliés, tout comme le bombement Durancien, au régime compressif qui affecte le Sud-Est de la France à cette période, induit par la rotation de la plaque ibérique. Cette théorie fait écho à celle proposée par Hibschi *et al.*, 1992, argumentée par ses mesures de glissements sédimentaires et des données structurales dans les massifs Ventoux-Lure et dans l'Arc de Castellane.

Au contraire, l'ensemble de ces phénomènes peuvent être interprétés comme les conséquences du soulèvement d'un épaulement de rift. L'extension liée au rifting sur la marge nord de la plaque ibérique se propagerait alors vers l'est et engendrerait un soulèvement d'origine isostatique et/ou thermomécanique près de la limite plateforme/bassin, et non d'origine compressive dans le Sud-Est de la France. Cette théorie est en accord avec le modèle cinématique d'Olivet, 1996, qui attribue cette distension au mouvement relatif entre l'Eurasie et l'Ibérie (cf. chapitre 6, paragraphe 2, p. 242).

L'étude de l'Urgonien du Sud-Est de la France présentée ici démontre que le développement de la plateforme urgonienne a eu lieu dans un système extensif en blocs basculés, et appuie

donc cette dernière hypothèse géodynamique.

La construction d'un modèle numérique en trois dimensions, dont 90% des résidus peuvent être considérés comme acceptables, montre la cohérence géologique et géométrique des concepts d'évolution de la plateforme urgonienne développés dans cette étude. Il a également permis d'illustrer la grande variabilité de l'Urgonien, tant d'un point de vue stratigraphique que faciologique, à travers l'ensemble du Sud-Est de la France (cf. Figure 7-1, p. 271, Figure 7-2, p. 272 et Figure 7-3, p. 273).

Sur les bordures du bassin Vocontien, nord et sud, ainsi que sur la bordure du bassin de la Bédoule à la base de l'Aptien, les cortèges sédimentaires se développent en clinoformes et les cortèges de bas niveaux représentant la majorité de la série urgonienne. Au contraire, sur la plateforme, l'Urgonien n'est représenté que par les cortèges transgressifs et de haut niveaux (cf. Figure 7-1, p. 271).

Au sud du bassin Vocontien, la tectonique synsédimentaire permet le dépôt de l'Urgonien sous forme d'éventail dans les blocs basculés. Des séries d'épaisseurs réduites à faciès internes se déposent en tête de blocs alors que des séries plus épaisses, à faciès plus externes comblent les zones plus subsidentes.

En fonction des secteurs, l'évolution des faciès de la plateforme urgonienne est très différente. Contrairement à l'évolution générale, les blocs situés les plus au sud sont le lieu de dépôt de plus en plus externes en raison de l'importante subsidence qui aboutira à l'ouverture du bassin Bédoulien dans lequel des faciès de bassin finissent par se développer. En revanche, un peu plus au nord, les phénomènes d'épaulement de rift accentuent la diminution de l'espace disponible à la sédimentation dans lequel seuls des faciès de lagon interne et des faciès de plage finissent par se déposer (cf. Figure 7-3, p. 273).

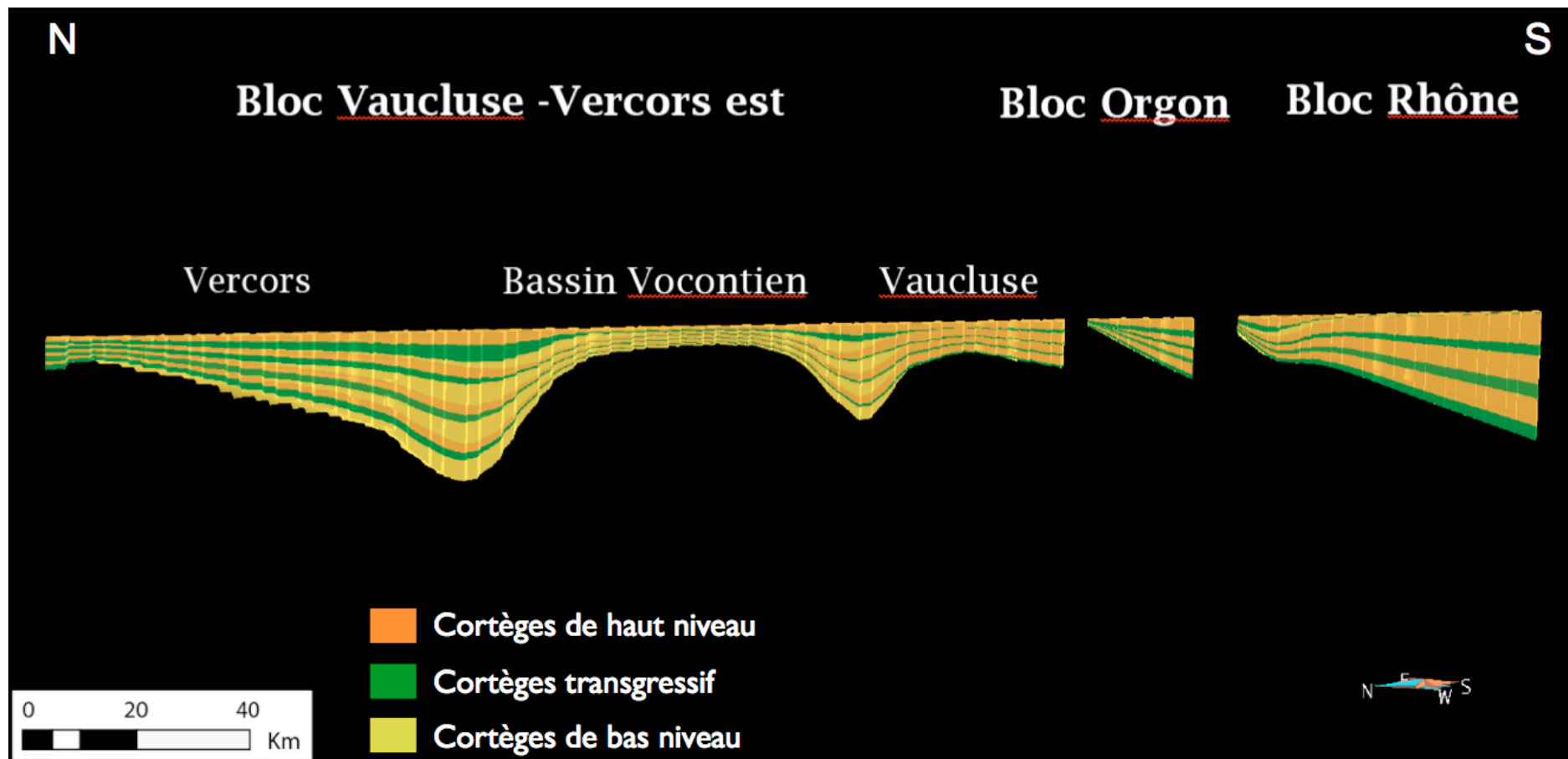
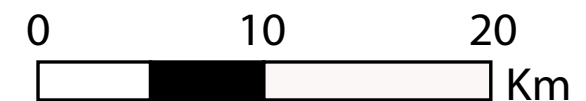


Figure 7-1 : Coupe nord sud à travers l'ensemble du modèle renseignés en cortège sédimentaires.



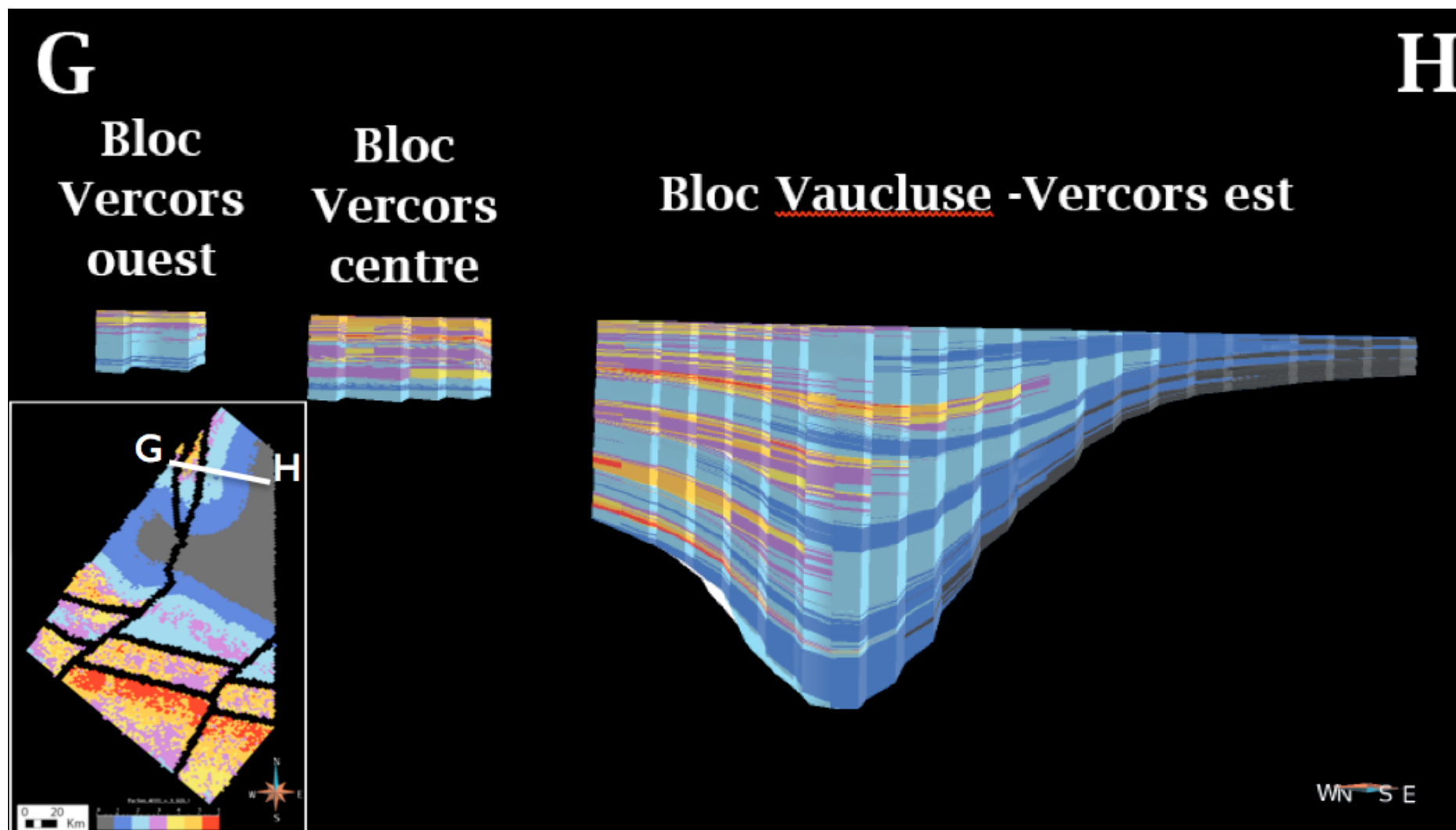


Figure 7-2 : coupe est-ouest du modèle renseigné en environnement de dépôt à travers le massif du Vercors. Pour l'échelle des environnements de dépôts, se référer au tableau de faciès chapitre 3, paragraphe 3.3, p. 79.

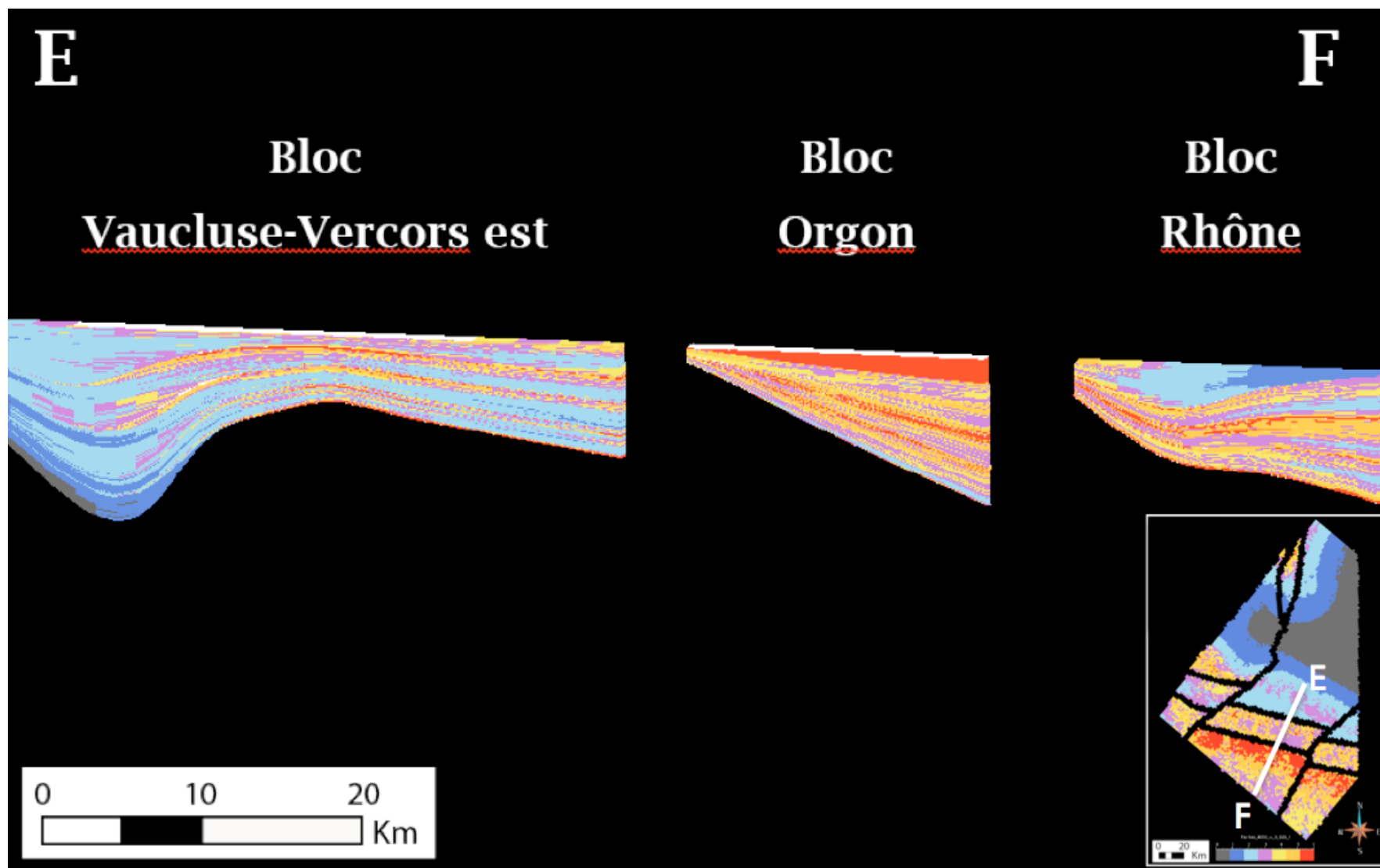


Figure 7-3 : coupe nord-ouest - sud-est du modèle renseigné en environnement de dépôt à travers les monts du Vaucluse et la Camargue. Pour l'échelle des environnements de dépôts, se référer au tableau de faciès chapitre 3, paragraphe 3.3, p. 79.

## 7 PERSPECTIVES

Afin de critiquer le modèle d'évolution proposé, il serait intéressant de récolter de nouvelles données et de les intégrer au modèle numérique (en terme d'épaisseur et d'environnement de dépôt). Particulièrement dans les secteurs du Vaucluse, des Alpilles, du Lubéron et de la Provence, où les données sont les plus dispersées et où l'organisation de l'Urgonien est la moins bien contrainte.

Étendre le secteur d'étude vers le nord, à la Chartreuse et au Jura suisse, permettrait d'apporter plus de contraintes (biostratigraphiques et géochimiques) et dévaluer les facteurs contrôlant l'Urgonien de ces régions.

La mise en évidence du rôle des différents facteurs, particulièrement de la tectonique, ayant influencé l'Urgonien du Sud-Est de la France peut permettre une meilleure appréciation des facteurs responsables de l'organisation de formations analogues telles que celles, réservoirs, du Moyen-Orient.

Des mesures en laboratoire, à partir de différents échantillons de roche, permettraient la détermination d'une distribution de valeurs de porosité et de perméabilité à chaque environnement de dépôt. Des valeurs de paramètres pétrophysiques (qui pourraient évoluer si les effets de la diagénèse sont également modéliser) pourraient ainsi être assignées à chaque cellule du modèle numérique créé dans le cadre de cette étude. Si les effets de la diagénèse sont également modélisés, ces valeurs pourraient évoluer. Ainsi, des simulations d'écoulement seraient exécutées dans des modèles réservoirs plus réalistes.







## RÉFÉRENCES

- Adatte, T., Arnaud Vanneau, A. Arnaud, H., Blanc-Alétru, M. C., Bodin, S., Carrio-Schaffhauser, E., Föllmi, K., Godet, A., Chaker Raddadi, M. & Vermeulen, J. (2005). «The Hauterivian-Lower Aptian sequence stratigraphy from Jura platform to Vocontian basin: A multidisciplinary approach.» *Géologie Alpine. Série Spéciale «Colloques et Excursions»* N°7, 181 p.
- Adatte, T., Arnaud-Vanneau, A., Arnaud, H., Blanc-Alétru, M.C., Bodin, S., Carrio-Schaffhauser, E., Follmi, K. B., Godet, A., Chaker Raddadi, M. & Vermeulen, J. (2005). «Urgonian deposits and Barremian-early Aptian sequence stratigraphy in the Vercors massif. The Hauterivian-Lower Aptian sequence stratigraphy from Jura Platform to Vocontian Basin: A multidisciplinary approach.» *Série Spéciale «Colloques et Excursions»* N°7: 97-126.
- Ager, D. V. (1981). «The Nature of the Stratigraphical Record.» Second Edition, Macmillan.
- Aguirrezabala, L.M. & Garcia-Mondéjar J. (1992). «Tectonic origin of carbonate depositional sequences in a strike-slip setting (Aptian, northern Iberia).» *Sedimentary Geol.*, 81, 163-172.
- Al Ghamdi, N. & Read, F. J., (2010). «Facies-based sequence stratigraphic framework of the Lower Cretaceous rudist platform, Shu'aiba Formation, Saudi Arabia.» In: F.S.P. van Buchem, M.I. Al Hussein, F. Maurer and H.J. Droste (Eds.), Barremian-Aptian stratigraphy and hydrocarbon habitat of the eastern Arabian Plate. *GeoArabian Spec. Publ.* 4, Gulf Petrolink, Bahrain, 2, 367-410.
- Alsharhan, A. S., (1993). «Asab Field - United Arab Emirates, Rub Al Khali Basin, Abu Dhabi.» In: Foster, N.H. and Beaumont, E.A. (Compilers), *Structural Traps VIII. AAPG, Treatise of Petroleum Geology, Atlas of Oil and Gas Fields*, 69-97.
- Alsharhan, A.S., (1990). Geology and reservoir characteristics of Lower Cretaceous Kharai Formation in Zakum Field, Abu Dhabi, United Arab Emirates. In: Brooks, J. (Ed.), *Classic Petroleum Provinces. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 50, 299-316.
- Amthor J., Kerans, C. & Gauthier, P., (2010). «Reservoir characterisation of a Shu'aiba carbonate ramp-margin field, northern Oman.» In: F.S.P. van Buchem, M.I. Al Hussein, F.

- Maurer & H.J. Droste (Eds.), Barremian-Aptian stratigraphy and hydrocarbon habitat of the eastern Arabian Plate. *GeoArabian Spec. Publ.* 4, Gulf Petrolink, Bahrain, 2, 549-576
- Arnaud H. (1965). «Contribution à l'étude géologique du Vercors méridional.» Thèse, Univ. Grenoble, 77 p.
- Arnaud H. (1981). «De la plate-forme urgonienne au bassin vocontien : le Barrémo-Bédoulien des Alpes occidentales entre l'Isère et le Büech (Vercors méridional, Diois oriental et Dévoluy).» Thèse, Grenoble ; Géologie Alpine, Grenoble, Mém. H.S., n° 12, 3 vol., 804 p.
- Arnaud H., Arnaud-Vanneau A., Blanc, E.. & Bulot, L. (1993). «The Urgonian platform and its margin.» ODP leg 143 post-cruise meeting field trip. *Géologie alpine*, sér. sp. 3, 59-104.
- Arnaud-Vanneau ,A. (1980). «Micropaléontologie, paléoécologie et sédimentologie d'une plate-forme carbonatée de la marge passive de la Téthys : l'Urgonien du Vercors septentrional et de la Chartreuse (Alpes occidentales).» Thèse, Grenoble ; Géologie Alpine, Grenoble, Mém. H.S., n° 11, 874 p.
- Arnaud-Vanneau, A. & Arnaud, H. (1990). «Hauterivian to Lower Aptian carbonate shelf sedimentation and sequence stratigraphy in the Jura and northern Subalpine chains (southeastern France and Swiss Jura). Carbonate Platforms: Facies, Sequences and Evolution.» M. E. Tucker, J. L. Wilson, P. D. Crevello, J. R. Sarg and J. F. Read, Blackwell Scientific Publications, Special Publication of the International Association of Sedimentologists. 9: 203-233.
- Arnaud-Vanneau, A., Arnaud, H., Charollais, J., Conrad, M.-A., Cotillon, P., Ferry, S., Masse, J.-P. & Peybernès, B. (1979). «Paléogéographie des calcaires Urgoniens du Sud de la France.» *Geobios*, Mémoire spécial n° 3: 363-383.
- Arnaud-Vanneau, A., Arnaud, H., Thieuloy, J.P. (1976). «Bases nouvelles pour la stratigraphie des calcaires urgoniens du Vercors.(Massifs subalpins septentrionaux-France).» *Newsletters on Stratigraphy* 5(2/3), 16 p.
- Arnaud-Vanneau, A., Carrio-Schaffhauser, E. (1994). «Reservoir Aspects in Relationship with Sequence Boundaries in Carbonate Platforms.» *Hydrocarbon and Petroleum Geology of France*, Springer Berlin Heidelberg. 4: 321-323.

- Arnaud, H. (1988). «Subsidence in certain domains of southeastern France during the Ligurian Tethys opening and spreading stages.» *Bull. Soc. géol. Fr.* 8: 725-732.
- Arnaud, H. (2005). «The South-East France basin (SFB) and its Mesozoic evolution.» *Géologie Alpine. Série spéciale «colloque et excursions»* n°7.
- Arnaud, H. & Arnaud-Vanneau, A. (1989). «Séquences de dépôt et variations du niveau relatif de la mer au Barrémien et à l'Aptien inférieur dans les massifs subalpins septentrionaux et le Jura (Sud-Est de la France).» *Bull. Soc. géol. Fr.* 3: 9 p.
- Arnaud, H. & Arnaud-Vanneau, A. (1991). «Les calcaires urgoniens des Massifs subalpins septentrionaux et du Jura (France) : Age et discussion des données stratigraphiques.» *Géologie Alpine* 67.
- Arnaud, H. & Arnaud-Vanneau, A., Argot, A., Carrio, C. (1995). «Sequence stratigraphy in a carbonate setting, platform to basin section of the Urgonian platform (Lower Cretaceous), Vercors Plateau, Glandasse Plateau to Isère Valley, Southeast France.» *AAPG, Field Trip Notes, Nice*: 14-16.
- Arnaud, H., Arnaud-Vanneau, A., Blanc-Alétru, M.C., Adatte, T., Argot, M., Delanoy, G., Thieuloy, J.P., Vermeulen, J., Virgone, A., Virlouvét, B. & Wermeille, S. (1998). «Répartition stratigraphique des orbitolinidés de la plate-forme urgonienne subalpine et jurassienne (SE de la France).» *Géologie Alpine* 74: 3-89.
- Babinot, J.F., Gervais, J., Masse, J.P. & Tronchetti G. (1971). «Contribution à l'étude micropaléontologique et sédimentologique de la formation des « marnes vertes infracrétacées » de la Basse-Provence occidentale (Sud-Est de la France).» *Ann. Univ. De Provence, Sci.*, XLVI : 189-208.
- Bastide, F. M., Massonnat, G., Virgone, A. & Pabian-Goyheneche, C. (2012). «An Outcrop Analog of Kharaib & Shu'aiba Reservoirs: the Urgonian Platform of Southeastern France (Gard and Ardèche).» *Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition. Abu Dhabi, UAE, Society of Petroleum Engineers*: 12 p.
- Baudrimont, A. F. (1977). «Un bassin mésogéen du domaine péri-alpin: le Sud-Est de la France.» *Bulletin des centres de recherches explor.-product. Elf-Aquitaine*.

- Bellamy, J. (1963). «Contribution à l'étude géologique du Vercors septentrional (Isère).» Thèse, Univ. Grenoble.
- Bernaus, J. M., Arnaud-Vanneau, A., & Caus, E. (2003). «Carbonate platform sequence stratigraphy in a rapidly subsiding area: the Late Barremian–Early Aptian of the Organya basin, Spanish Pyrenees.» *Sedimentary Geology*, 159(3), 177-201.
- Berner, R. A., & Kothavala, Z. (2001) «GEOCARB III: A revised model of atmospheric CO<sub>2</sub> over Phanerozoic time.» *American Journal of Science*, 301(2), 182-204.
- Blanc J.J. & Masse, J.P. (1965). «L'Urgonien du Chainon de la Fare-Lançon (Bouche du Rhône).» *C. R. Soc. Géol. France*, (7), IX : 561-571.
- Blanc, J.J. (1969). «Sédimentologie et paléocéanographie de l'Urgonien au sud de Saint Christol et du plateau d'Albion (Vaucluse).» *Rec. Trav. Stat. Mar. Endoume*, 46 (62) : 213-251.
- Bodin, S., Vermeulen, J., Godet, A. Föllmi, K. B., (2006). «New data on the age of the installation of Urgonian-type carbonates along the northern Tethyan margin: biostratigraphy of the Chopf Member (Helvetic Alps, eastern Switzerland).» *Comptes Rendus Géosciences* 338: 727-733.
- Bonin, A. (2011). «Relations entre les variations climatiques, les perturbations du cycle du carbone et les crises de la production carbonatée: application au Crétacé inférieur.» Doctoral dissertation, Université de Bourgogne.
- Borgomano, J. R. F., Masse, J-P. & Al Maskiry, S. (2002). «The lower Aptian Shu'aiba carbonate outcrops in Jebel Akhdar, northern Oman: impact on static modelling of Shu'aiba petroleum reservoirs.» *AAPG Bull.*, 86 (9), 1513-1529.
- Borgomano, J. R. F., Masse, J.P., Fenerci-Masse, M. & Fournier, F. (2012). «Petrophysics of lower Cretaceous platform carbonate outcrops in Provence (SE France): Implications for carbonate reservoir characterisation.» *Journal of Petroleum Geology* 36(1) : 5-41.
- Bourrouilh, R., Richert, J. P. & Zolnai, G. (1995). «The North Pyrenean Aquitaine Basin, France: Evolution and Hydrocarbons.» *AAPG Bulletin*, 79 : 831-853.
- Brun (de), P., Chatelet, C. & Cossmann, M. (1916). « Le Barrémien supérieur à faciès urgonien de Brouzet-les-alais (Gard) » *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 51, (2), 53 p.



- Busnardo, R. (1970). «Les Pseudothurmannia (Ammonoidea) de l'Hauterivien supérieur de la Montagne de Lure.» Doc. Labo. Géol. Fac. Sci. Lyon, Notes et Mém., 37 : 133-143.
- Busnardo, R., & Foury, G. (1966). «Le Barrémien et ses limites dans le centre de la Montagne de Lure (Basses-Alpes).» Bulletin de la Société Géologique de France, 7(8) : 415-422.
- Canérot J. & Delavaux F., (1986). «Tectonique et sédimentation sur la marge nord Ibérique des chaînons béarnais, Pyrénées basco-béarnaises.» Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, v. 302, sér. II, no. 15 : 951-956
- Canérot, J. (1989). «Rifting eocrétacé et halocinèse sur la marge ibérique des Pyrénées Occidentale (France). Conséquences structurales.» Bull. Cent. Rech. Explor. Prod. Elf Aquitaine, 13 : 87-99.
- Canérot, J. (1991). «Comparative study of the eastern Iberides (Spain) and the western Pyrenees (France) Mesozoic basins.» Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 87(1) : 1-28.
- Carez, L. (1882). « Observaions sur la note de M. Torcapel sur l'Urgonien du Languedoc.» Bull. Soc. Géol. Fr., Paris 3, t. 11 : 95-102, 1tabl.
- Carez, L. (1883). «L'Urgonien de la vallée du Rhône.» Bull. Soc. Géol. France, XII, 3, 351 p.
- Charles, R. P. (1946). «Note sur les fossiles hauteriviens du massif d'Allauch.» Bull. Mus. Hist. Nat. Marseille, VI, 3-4 : 106-113.
- Charles, R. P., (1947-1948). «Notes sur les fossiles hauteriviens du massif d'Allauch.» Bull. Mus. Hist. Nat. Marseille, I : 1-35.
- Charollais, J., Clavel, B., Schroeder, R., Busnardo, R. & Masse J-P. (1998). «La plate-forme urgonienne. Un exemple de plate-forme carbonatée : biostratigraphie, stratigraphie séquentielle, sédimentologie, études régionales.» Publications du Département de Géologie et Paléontologie, Université de Genève, (Série «Guide géologique»), n° 8, 181 p.
- Charollais, J., Clavel, B., Schroeder, R., Busnardo, R. & Masse, J-P. (1998). «La plateforme urgonienne. Un exemple de plate-forme carbonatée : biostratigraphie, stratigraphie séquentielle, sédimentologie, études régionales.» Guide Géologique. Genève, Université de Genève.

- Chorowicz, J., Moullade, M., Saint-Marc, P. & Thiele, R. (1972). «Sur l'âge Barrémien supérieur-Aptien inférieur des calcaires marmorisés du Roc du Candelon, dans le massif de la Loube, près de Brignoles (Var).» C. R. Soc. Géol. France, 3 : 351-352.
- Claudel, M. E., Dumont, T., & Tricart, P. (1997). «Une preuve d'extension contemporaine de l'expansion océanique de la Téthys ligure en Briançonnais: les failles du Vallon Laugier.» Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science, 325(4) : 273-279.
- Clavel, B., Busnardo, R., Charollais J., Conrad, M. & Granier, B., (2010). «Répartition biostratigraphique des orbitolinidés dans la biozonation à ammonites (plate-forme urgonienne du Sud-Est de la France).» Carnets de Géologie / Notebooks on Geology Article 2010/96 (CG2010\_A06) : 1-53.
- Clavel, B., Busnardo, R., Charollais J., Schroeder, R., Granier, B., Ferré, B. & Ecoffey, J.P. (1998). « Biostratigraphie, lithostratigraphie et organisation séquentielle de la plate-forme urgonienne du Jura suisse au Sud-Est de la France. », rapport interne, TOTAL, 103 p.
- Clavel, B., Busnardo, R., Charollais, J., Conrad, M. & Granier, B. (2009). «Nouvelles données sur la répartition des Orbitolinidés à l'Hauterivien supérieur, au Barrémien et à l'Aptien inférieur dans le Sud Est de la France et le Jura Franco-Suisse.» Arch. Sci (2009) 62 : 125-146.
- Clavel, B., Charollais, J., Schroeder, R. & Busnardo, R. (1995). «Réflexions sur la biostratigraphie du Crétacé inférieur et sur sa complémentarité avec l'analyse séquentielle : exemple de l'Urgonien jurassien et subalpin.» Bull. Soc. géol. France 166(6): 663-680.
- Clavel, B., Charollais, J., Schroeder, R., Oertli, H. & Busnardo, R. (1994). «Biozonation de l'Hauterivien supérieur et du Barrémien inférieur en domaine de plate-forme carbonatée.» Pub. Dép. Géol. Paléont. Univ. Genève, 14 : 1-14.
- Clavel, B., Conrad, M. A., Busnardo, R., Charollais, J. & Granier, B. (2013). «Mapping the rise and demise of Urgonian platforms (Late Hauterivian - Early Aptian) in southeastern France and the Swiss Jura.» Cretaceous Research 39(0) : 29-46.

- Combes, P.J. & Peybernes, B. (1989). «Tectonique albienne dans les gisements de bauxite des Pyrénées ariégeoises (France) en relation avec l'évolution géodynamique de la marge passive européenne.» C.R. Acad. Sci., Paris, 308, II : 953-959.
- Combes, P.J., Peybernès, B. & Leyreloup, A. F. (1998). «Altérites et bauxites, témoins des marges européenne et ibérique des Pyrénées occidentales au Jurassique supérieur - Crétacé inférieur, à l'ouest de la vallée d'Ossau (Pyrénées-Atlantiques, France).» C. R. Acad. Sc. Paris, 327 : 271-278.
- Conrad, M-A. (1969). «Les calcaires urgoniens dans la région entourant Genève.» *Eclogae geol. Helv.* 62/1, 79 p.
- Conrad, M-A., Clavel, B., Granier, B., Charollais, J., Busnardo, R., Erba, E., Gardin, S., Jan du Chêne, R., Decrouez, D., Cherchi, A., Schroeder, R., Sauvagnat, J. & Weidmann, M. (2011) «Discussion of: Stratigraphic, sedimentological and palaeoenvironmental constraints on the rise of the Urgonian platform in the western Swiss Jura, by A. Godet et al., *Sedimentology* (2010)» *Sedimentology*, 57 : 1088-1125.
- Contensuzas, C. (1980). «Le Barrémo-Bédoulien entre Viviers et Cruas.» Thèse de 3eme Cycle, Univ. Cl. Bernard, Lyon, 1.
- Coquand, H. (1862). «Sur la convenance d'établir dans le groupe inférieur de la formation crétacée un nouvel étage entre le néocomien proprement dit (couche à *Toxaster complanatus* et à *Ostrea Couloni*) et le néocomien supérieur (étage urgonin d'Alc. d'Orbigny).» *Bulletin de la Société Géologique de France* (2), 19 : 531-541.
- Coquand, H. (1864). «Réunion extraordinaire de la société géologique de France à Marseille.» *Soc. Géol. France* 21, 479 p.
- Cornet, C. (1966). «Sur la colline du vieux Nans dans le massif de la Sainte-Baume (Var).» C.R. Acad. Sc. Paris : 2317-2320.
- Corroy, G. (1939). «Le massif de la Sainte-Baume. Etudes géologiques.» *Bull. Serv. Cart. Gol. France*, XLI, 201, 127 p.
- Cotillon, P., Ferry S., Busnardo R., Lafarge D. & Renaud B. (1979). « Synthèse stratigraphique et paléogéographique sur les faciès urgoniens du Sud de l'Ardèche et du Nord du Gard (France S-E) », *Geobios*, Vol. 12, Sup. 1 : 121-139.

- Curnelle, R. & Dubois P. (1986). « Evolution mesozoïque des grands bassins sédimentaires français; bassins de Paris, d'Aquitaine et du Sud-Est. » Société Géologique de France (8), 4 : 529-546.
- Dardeau, G., Atrops, F., Fortwengler, D., de Graciansky, P. C. & Marchand, D. (1988). «Jeux de blocs et tectonique distensive au Callovien et à l'Oxfordien dans le bassin du Sud-Est de la France.» Bulletin de la Société géologique de France, 4(5) : 771-777.
- Dasarathi N. (1965). «Etude géologique de la bordure occidentale du Vercors.» Thèse, Univ. Grenoble. 89 p.
- Debroas, E.J., Mediavilla, F. & Souquet, P. (1978). «La zone de failles transcurrentes de Bigorre dans la région de Lourdes et de Bagnères (Pyrénées basco-béarnaises).» Bull. Soc. géol. Fr., (7), XX, 5 : 631-638.
- Denizot, G (1952). «La tectonique du Crétacé moyen en Provence (France).» C. R. 10e Congrès Géol. Internat. Alger, XIII-XIV : 343-349.
- Denizot, G. (1934). «Description des massifs de Marseilleveyre et du Puget.» Ann. Mus. Hist. Nat. Marseille, XXVI, 5, 229 p.
- Denizot, G. (1946). «Sur l'âge du Roc de Candellon et du calcaire soi-disant urgonien de Camps près Brignoles (Var).» C. R. Soc. Géol. France : 101-102.
- Denizot, G. (1947). «Sur l'extension du faciès urgonien entre Marseille et Toulon.» C.R. Acad. Sci. Paris, 225, 756 p.
- Dercourt, J., Gaetani, M., Vrielynck, B., Barrier, E., Biju-Duval, B. Brunet, M.-F., Cadet, J.-P., Crasquin, S. & Sandulescu, M. (Eds.), (2000). «Atlas Peri-Tethys. Palaeogeographical Maps» CCGM / GMW, Paris: 24 maps and explanatory notes: I–XX, 269 p.
- Descamps, E., Duchamp, D. & Pitaval, D. (2009). «Étude du réservoir karstique urgonien de la Lussanénque.» Rapport interne, TOTAL, 516 p.
- Douville, F. (1947). «Étude géologique de la dépression du Bas-Rhône. Etudes stratigraphiques et tectoniques dans les Alpilles.» Bull. Soc. Etud. Sci. Nat., Vaucluse : 32-47.
- Douville, H. (1918). «Le Barrémien supérieur de Brouzet, III : les Rudistes.» Bull. Soc. Géol. France, Paléont., XVIII, 41, 18 p.

- Ducasse, L., Vélasque, P. C. & Muller, J. (1986). «Glissement de couverture et panneaux basculés dans la région des Arbailles (Pyrénées occidentales) : Un modèle évolutif crétacé de la marge nord-ibérique à l'est de la transformante de Pamplona.» *C. R. Acad. Sc. Paris*, 303 : 1477-1482.
- Eaton, A.D., Clesceri, L.S. & Greenberg, A. E. (1995). «Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.» (19th edition).
- Emmanuel, L., Renard, M., (1993). «Carbonate geochemistry (Mn,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) of the late TithonianBerriasian pelagic limestones of the Vocontian trough (SE France).» *Bulletin de Centre de Recherches et Exploration-Production. Elf-Aquitaine* 17 : 205-221.
- Erba, E., Channell, J.E.T., Claps, M., Jones, C., Larson, R., Opdyke, B., Premoli-Silva, I., Riva, A., Salvini, G. & Torricelli, S. (1999). «Integrated stratigraphy of the Cismon Apticore (southern Alps, Italy): a “reference section” for the BarremianAptian interval at low latitudes.» *Journal of Foraminiferal Research* 29 : 371-391.
- Fabre-Taxy, S., Moullade, M. & Thomel, G. (1965). Le Bédoulien dans sa région type. La Bédoule-Cassis (B. du Rh.)» in *Coll. Sur le Crétacé inf.*, Lyon 1963. *Mém. B.R.G.M.*, 34 : 173-199.
- Fahy, J.C. (1965). «Etude géologique du Mont Ventoux. Région de Vaison.»
- Faure, D. (1965). « Le Barrémien du Sud du couloir rhodanien.» In *coll. Sur le Crétacé inf.* Lyon. *Mém. B.R.G.M.*, 34 : 139-146.
- Faure, D. (1965). «Le Barrémien du Sud du couloir rhodanien.» in *Coll. Sur le Crétacé inf.* Lyon, *Mém. B.R.G.M.*, 34 : 173-199.
- Föllmi, K. B. (2012). «Early Cretaceous life, climate and anoxia.» *Cretaceous Research*, 35 : 230-257.
- Föllmi, K. B., Bôle, M., Jammet, N., Froidevaux, P., Godet, A., Bodin, S., Adatte, T., Matera, V., Fleitmann, D. & Spangenberg, J. E. (2012). «Bridging the Faraoni and Selli oceanic anoxic events: short and repetitive dys- and anaerobic episodes during the late Hauterivian to early Aptian in the central Tethys.» *Climate of the Past* 8 : 171-189.

- Föllmi, K.B., Godet, A., Bodin, S. & Linder, P. (2006). «Interactions between environmental change and shallow-water carbonate build-up along the northern Tethyan margin and their impact on the early Cretaceous carbon-isotope record.» *Paleoceanography* 21, doi:10.1029/2006PA001313.
- Fournier, E. (1890). «Esquisse géologique des environs de Marseille.» Impr. Achard, 106 p.
- Fournier, E. (1895). «Etudes stratigraphiques sur le massif d'Allauch.» *Bull. Soc. Géol. France*, XXIII (3) : 508-545.
- Godet, A. (2006). «The evolution of the Urgonian platform in the Western Swiss Jura realm and its interactions with palaeoclimatic and palaeoceanographic change along the Northern Tethyan Margin (Hauterivian - earliest Aptian).» *Institut de Géologie et d'Hydrogéologie. Neuchâtel, Université de Neuchâtel*, 405 p.
- Godet, A., Blanc-Alétru, M. C. Godet, A., Blanc-alétru, M. C., Baudin, S., Adatte, T. & Föllmi, K. B. (2005). «The Hauterivian-Barremian of the Western Swiss Jura around Neuchâtel.» *Série Spéciale «Colloques et Excursions» n°7*: 79-96.
- Godet, A., Bodin, S., Föllmi, K. B., Vermeulen, J., Gardin, S., Fiet, N., Adatte, T., Berner, Z., Stüben, D. & van de Schootbrugge, B. (2006). «Evolution of the marine stable carbon-isotope record during the early Cretaceous: A focus on the late Hauterivian and Barremian in the Tethyan realm.» *Earth and Planetary Science Letters* 242(3-4): 254-271.
- Godet, A., Föllmi, K. B., Bodin, S., de Kaenel, E., Matera, V. & Adatte, T. (2010). «Stratigraphic, sedimentological and palaeoenvironmental constraints on the rise of the Urgonian platform in the western Swiss Jura.» *Sedimentology* 57(4) : 1088-1125.
- Godet, A., Föllmi, K. B., Bodin, S., de Kaenel, E., Matera, V., Adatte, T., Arnaud-Vanneau, A., Arnaud, H. & Vermeulen, J. (2012). «A Late Barremian age for the onset of Urgonian-type facies in the Swiss Jura Mountains.» Reply to the discussion by Conrad et al. on «Stratigraphic, sedimentological and palaeoenvironmental constraints on the rise of the Urgonian Platform in the western Swiss Jura by Godet et al. (2010)» *Sedimentology*, 57 : 1088-1125.
- Goguel, J. (1932). « Sur l'extension des faciès urgoniens dans les Monts de Vaucluse » *Bull. Soc. Géol. Fr., Paris*, (5), t. II : 445-464.

- Goguel, J. (1932). « Sur l'extension des faciès urgoniens dans les Monts de Vaucluse » Bull. Soc. Géol. Fr., Paris, (5), t. II : 445-464.
- Goguel, J. (1944). «Description géologique des Alpilles.» Bull. Cart. Géol. France, 214, XLIV : 429-457.
- Gong, Z., Langereis, C. G., & Mullender, T. A. T. (2008). «The rotation of Iberia during the Aptian and the opening of the Bay of Biscay.» Earth and Planetary Science Letters, 273(1) : 80-93.
- Gong, Z., van Hinsbergen, D. J., Vissers, R. L., & Dekkers, M. J. (2009). «Early Cretaceous syn-rotational extension in the Organyà basin—new constraints on the palinspastic position of Iberia during its rotation.» Tectonophysics, 473(3) : 312-323.
- Gouvernet, C. (1963). «Le Miocène de la région de Salon-de-Provence (B. du Rh.) Stratigraphie et tectonique.» Trav. Lab. Géol. Fac. Sci. Univ. Marseille, VII : 129-145.
- Graciansky (de), P. C. & Lemoine, M. (1988). «Early Cretaceous extensional tectonics in the southwestern French Alps : a consequence of North-Atlantic rifting during Tethyan spreading.» Bull. Soc. géol. Fr., (8), IV, 15 : 733-737.
- Granier, B., Clavel, B., Moullade, M., Busnardo, R., Charollais, J., Tronchetti, G. & Desjacques, P. (2013). «L'Estellon (Baronnies, France), a «Rosetta Stone» for the Urgonian biostratigraphy.» Carnets de Géologie [Notebooks on Geology], Brest, Article 2013/04 (CG2013\_A04) : 163-207.
- Gras, A. (1852). «Catalogue des corps organisés fossiles qui se rencontrent dans le département de l'Isère.» imprimerie Maisonville, Grenoble.
- Guieu, G. (1963). «Le Néocomien du Chainon de l'Etoile.» Ann. Fac. Sci. Marseille, XXXIV : 33-46.
- Guieu, D. (1963). «Etude lithologique du Néocomien du Massif de Marseilleveyre.» Dipl. Et. Sup. Marseille, 73 p.
- Guieu, G. (1966). «Etude stratigraphique et tectonique des formations dolomitiques de la zone centrale de la chaîne de l'Etoile, au nord de Marseille.» Bull. Soc. Géol. France, 8 (7) : 712-726.



- Guieu, G. (1968). «Etude tectonique de la région de Marseille.» Thèse Doctorat d'Etat, Marseille, 604 p.
- Hamdan, W. (1977). «Le Crétacé inférieur de la région de Brouzet-les-Alès (Gard). Stratigraphie et cartographie, sédimentologie des faciès urgoniens.» Unpublished PhD thesis, Sciences de la Terre, Université C. Bernard-Lyon.
- Handy, M. R., Schmid, S., Bousquet, R., Kissling, E., & Bernoulli, D. (2010). «Reconciling plate-tectonic reconstructions of Alpine Tethys with the geological–geophysical record of spreading and subduction in the Alps.» *Earth-Science Reviews*, 102(3) : 121-158.
- Harris, T. J., Hay, J. T. C. & Twobley, B. N., (1968). «Contrasting limestone reservoirs in the Murban Field, Abu Dhabi.» 2nd Aime Regional Technical Symposium, Saudi Arabia : 149-187.
- Hassan, T. H. & Wada, Y., (1981). «Geology and development of Thamama Zone 4, Zakum Field.» *Journ. Petrol. Tech.*, July : 1327-1337.
- Haug, E. (1925). «Les nappes de charriage de la Basse-Provence. I – La région toulonnaise.» *Mém. Carte Géol. France*, 304 p.
- Hebert, E. (1872). «Documents relatifs au terrain crétacé du Midi de la France.» *Bull. Soc. Géol. France*, 2, 29, 393 p.
- Hebert, H. (1871). «Le Néocomien dans le Midi de la France (Drôme et Basse-Alpes).» *Bull. Soc. Géol. France*, 2, 29, 393 p.
- Hennig, S., Weissert, H. & Bulot, L. (1999). «C-isotope stratigraphy, a calibration tool between ammonite- and magnetostratigraphy: the ValanginianeHauterivian transition.» *Geologica Carpathica* 50 : 91-96.
- Herrle, J.O., Kössler, P., Friedrich, O., Erlenkeuser, H. & Hemleben, C. (2004). «Highresolution carbon isotope records of the Aptian to lower Albian from SE France and the Mazagan Plateau (DSDP Site 545): a stratigraphic tool for paleoceanographic and paleobiologic reconstruction.» *Earth and Planetary Science Letters* 218 : 149-161.
- Hibsch, C., Kandel, D., Montenat, C., & d'Estevou, P. O. (1992). «Evenements tectoniques cretaces dans la partie meridionale du bassin subalpin (massif Ventoux-Lure et partie

- orientale de l'arc de Castellane, SE France); implications géodynamiques.» *Bulletin de la Société Géologique de France*, 163(2) : 147-158.
- Huck, S., Heimhofer, U., Immenhauser, A. & Weissert, H. (2013). «Carbon-isotope stratigraphy of Early Cretaceous (Urgonian) shoal-water deposits: Diachronous changes in carbonate-platform production in the north-western Tethys.» *Sedimentary Geology* 290(0): 157-174.
- Huck, S., Heimhofer, U., Rameil, N., Bodin, S. & Immenhauser, A. (2011). «Strontium and carbon-isotope chronostratigraphy of Barremian-Aptian shoal-water carbonates: Northern Tethyan platform drowning predates OAE 1a.» *Earth and Planetary Science Letters* 304(3-4): 547-558.
- Hunt, D. & Tucker, M. E. (1995). «Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall—reply.» *Sedimentary Geology*, 95(1) : 147-160.
- Jacob, C. (1907). «Etude paléontologique et stratigraphique sur la partie moyenne des terrains crétacés dans les Alpes françaises et les régions voisines.» Thèse, Univ. Grenoble, 374 p.
- Jacquín, T., Arnaud-Vanneau, A., Arnaud, H., Ravenne, C. & Vail, P. R. (1991). «Systems tracts and depositional sequences in a carbonate setting : study of continuous outcrops from platform to basin at the scale of seismic lines.» *Marine and petroleum geology*, Amsterdam, 8, 2 : 122-139, 22 fig.
- James, V., Canérot, J. & Biteau, J. J. (1996). «Données nouvelles sur la phase de rifting atlantique des Pyrénées occidentales au Kimméridgien: la masse glissée d'Ouzous (Hautes Pyrénées).» *Géologie de la France*, 3 : 60-66.
- Jammes, S., Manatschal, G., Lavier, L. & Masini, E. (2009). «Tectonosedimentary evolution related to extreme crustal thinning ahead of a propagating ocean: example of the western Pyrenees.» *Tectonics*, 28(4), TC4012.
- Johnson, J. A. D. & Budd, S.R. (1975). «The geology of the zone B and zone C Lower Cretaceous limestone reservoirs of Asab Field, Abu Dhabi.» 9th Arab Petroleum Congress, Dubai, 109 (B-3), 24 p.

- Kilian, W. (1888). «Description géologique de la Montagne de Lure (Basses-Alpes).» Paris, 460 p.
- Kilian, W. (1895). «Notice stratigraphique sur les environs de Sisteron.» Bull. Soc. Géol. France, XXIII, 3 : 659-803.
- Kilian, W. (1907, 1910). *Lethaea Geognostica*.
- Kilian, W. (1912). « Sur une carte de répartition du faciès « Urgonien » dans le Sud-Est de la France » Assoc. Fr. Avanc. Sci., Nîmes : 361-375, 1 fig.
- Lafarge, D. (1978). «Etude géologique du plateau de Saint-Remèze, Ardèche, Stratigraphie, cartographie, sédimentologie, tectonique.» Thèse, Univ. Cl. Bernard, Lyon, 11 p. dactyl. 52 fig., 5 pl., 1 carte géol.
- Le Page, A. (1963). «Contribution à l'étude géologique de la bordure sud-ouest du Vercors : l'anticlinal de Bouvante et ses environs (Drôme).» Thèse, Univ. Grenoble, 2 fasc., 14 pl., 1 carte.
- Leenhardt, F. (1883). «Etude géologique de la région du Mont-Ventoux.» 273 p.
- Lemoine, M. (1984). «La marge occidentale de la Téthys ligure et les Alpes occidentales. Les marges continentales actuelles et fossiles autour de la France.» Masson, Paris : 155-248.
- Lemoine, M., Bas, T., Arnaud-Vanneau, A., Arnaud, H., Dumont, T., Gidon, M., Bourbon, M., De Graciansky, P. C., Rudkiewicz, J. L., Megard-Galli, J. & Tricart P. (1986). «The continental margin of the Mesozoic Tethys in the Western Alps.» *Marine and Petroleum Geology*, Vol.3, August 86 : 179-199.
- Lenoble, J. L., & Canérot, J. (1993). «Sequence stratigraphy of the Clansayesian (uppermost Aptian) formations in the western Pyrenees (France).» *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, 18 : 283-294.
- Leonide, P., Borgomano, J., Masse, J-P. & Doublet, S. (2012). «Relation between stratigraphic architecture and multi-scale heterogeneities in carbonate platforms: The Barremian - lower Aptian of the Monts de Vaucluse, SE France.» *Sedimentary Geology* 265(0) : 87-109.

- Leonide, P., Doublet S., Masse, J.P. & Borgomano, J. (2008). «Modélisation Géologique et pétrophysique des réservoirs et des unités d'écoulement dans les carbonates de plate-forme du Crétacé inférieur (Barrémien-Aptien) de Provence.» 134 p.
- Léonide, P., Floquet, M., Durlet, C., Baudin, F., Pittet, B. & Lécuyer, C. (2012). «Drowning of a carbonate platform as a precursor stage of the Early Toarcian global anoxic event (Southern Provence sub-Basin, South-east France).» *Sedimentology* 59(1): 156-184.
- Litsey, L.R., Macbride, W.L., Al-Hinai, K. M. & Dismukes, N. B. (1983). «Shu'aiba reservoir geological study, Yibal Field, Oman.» *Proceedings, 3rd Middle East Oil Show, Bahrain. SPE 11454* : 131-142
- Lory, C. (1846). «Études sur les terrains secondaires des Alpes dans les environs de Grenoble.» Thèse, Univ. Paris, 135 p., 10 fig.
- Lory, C. (1861). «Description géologique du Dauphiné pour servir à l'explication de la carte géologique de cette province. 2e partie : Massifs subalpins.» Savy Edit., Paris : 241-500.
- Maillard, J. (1965). « Le passage Barrémien-Aptien et ses rapports avec l'Urgonien du couloir rhodanien (entre Valence et Avignon)». *Mém. Bur. Rech. Géol. Min., Paris*, n° 34 : 147-156, 5 pl.
- Masse, J-P. (1976). «Les Calcaires Urgoniens de Provence Valanginien-Aptien inférieur, Stratigraphie Paléontologie.» Thèse. Marseille, Université d'Aix-Marseille II: 445 p.
- Masse, J-P. (1992). «The Lower Cretaceous Mesogean benthic ecosystems: palaeoecologic aspects and palaeobiogeographic implications.» *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 91 : 331-345.
- Masse, J-P. (1993). «Systématique, Stratigraphie et Paléobiogéographie du genre *Lovetchenia* (Requiniidae) du Crétacé inférieur méditerranéen.» *Geobios* 26(6) : 699-708.
- Masse, J-P. (1993). «Valanginian-Early Aptian Carbonate Platforms from Provence, Southeastern France. Cretaceous Carbonate Platforms.» *Simo, J. A. T., Scott, W. & Masse, J-P., Tulsa, Oklahoma, U.S.A., American Association of Petroleum Geologists. Memoir* 56: 363-375.

- Masse, J-P. (1995). «Lower Cretaceous biostratigraphy of southern France. A reference for Mesogean correlations.» *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 12 : 236-256.
- Masse, J-P. & Fenerci-Masse, M. (2006). «Carbonate production by rudist bivalves. The record of Late Barremian requienioid communities from Provence (SE France).» *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 234(2-4) : 239-257.
- Masse, J-P. & Fenerci-Masse, M. (2011). «Drowning discontinuities and stratigraphic correlation in platform carbonates. The late Barremian-early Aptian record of southeast France». *Cretaceous Research* 32 : 659-684.
- Masse, J-P. & M. Fenerci-Masse (2008). «Time contrasting palaeobiogeographies among Hauterivian-Lower Aptian rudist bivalves from the Mediterranean Tethys, their climatic control and palaeoecological implications.» *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 269(1-2) : 54-65.
- Masse, J-P. & M. Fenerci-Masse (2011). «Drowning discontinuities and stratigraphic correlation in platform carbonates. The late Barremian-Early Aptian record of southeast France.» *Cretaceous Research*, in press.
- Masse, J-P. & M. Fenerci-Masse (2013). «Bioevents and palaeoenvironmental changes in carbonate platforms: The record of Barremian - "Urgonian" limestones of SE France.» *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 386(0): 637-651.
- Masse, J-P. & Philip, J. (1976). «Paléogéographie et tectonique du Crétacé moyen en Provence: révision du concept d'isthme durancien.» *Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique*, 18(1) : 49-66.
- Masse, J-P., & Philip, J. (1976). «Paléogéographie et tectonique du Crétacé moyen en Provence: révision du concept d'isthme Durancien.» *Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique*, 18(1) : 49-66.
- Masse, J-P., Morycowa, E. & Fenerci-Masse, M. (2009). «Valanginian-Hauterivian scleractinian coral communities from the Marseille region (SE France).» *Cretaceous Research* 30 : 178-192.

- Masse, J. P., Fenerci, M. & Pernarcic, E. (2003). «Palaeobathymetric reconstruction of peritidal carbonates: Late Barremian, Urgonian, sequences of Provence (SE France).» *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 200 : 65-81.
- Masse, J. P., Gourrat, C., Orbette, D. & Schmuck, D. (1998). «Hauterivian rudist faunas of Southern Jura (France).» *Geobios*, 31 : 225-233.
- Masse, J.P. (1966). «Sur la présence en Basse-Provence d'un niveau à Favreina aff. Salevensis (Parejas), à la limite Barrémien-Aptien.» *C. R. Soc. Géol. France* : 298-300.
- Masse, J.P. (1969). «Présence de Crétacé inférieur à affinités nord-toulonnaises dans la région de Camps près de Brignoles (Var).» *Conséquences paléogéographiques. C.R. Soc. Géol. France*, 2 : 33-34.
- Masse, J.P. (1995). «Lower Cretaceous rudist biostratigraphy of southern France - a reference for mesogean correlations.» *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas* 12(2) : 236-256.
- Masse, J.P. & Thieuloy, J.P. (1975). «Données nouvelles sur la biostratigraphie et la paléobiogéographie de l'Aptien inférieur de Basse-Provence occidentale.» *C.R. Acad. Sci. Paris*, 280 : 1337-1339.
- Matheron, P. (1839). «Essai sur la constitution géognostique des Bouches du Rhône.» *Repert. Trav. Soc. Stat. Marseille*, III, 134 p.
- Matheron, P. (1842) «Catalogue méthodique et descriptif des corps organisés fossiles des Bouches-du-Rhône et lieu circonvoisins.» *Repert. trav. Soc. Stat. Marseille*, VI : 81-396.
- Mathey B., Floquet M. & Martinez-Torres, L. M. (1999). «The Leiza palaeo-fault: role and importance in the Upper Cretaceous sedimentation and palaeogeography of the Basque Pyrenees (Spain).» *C. R. Acad Sc. Paris*, 328 : 393-399.
- Menegatti, A., Weissert, H., Brown, R. S., Tyson, R. V., Farrimond, P., Strasser, A. & Caron, M. (1998). «High-resolution  $\delta^{13}\text{C}$  stratigraphy through the early Aptian «Livello Selli» of the Alpine Tethys.» *Paleoceanography* 13(5): 530-545.
- Montenat, C., Hibsich, C., Perrier, J. C., Pascaud, F. & de Bretizel, P. (1997). «Tectonique cassante d'âge crétacé inférieur dans l'Arc de Nice (Alpes-Maritimes, France).» *Géologie Alpine*, 73 : 59-66.

- Montenat, C., Janin, M.C. & Barrier, P. (2004). «L'accident du Toulourenc : une limite tectonique entre la plate-forme provençale et le Bassin vocontien à l'Aptien–Albien (SE France).» *C. R. Géosciences*, 336 : 1301-1310.
- Moss, S. & Tucker, M. E. (1995). «Diagenesis of Barremian-Aptian platform carbonates the Urgonian limestone formation of SE France: near-surface and shallow-burial diagenesis.» *Sedimentology*, Vol. 42 : 853-873.
- Olivet, J. L. (1996). «La cinématique de la plaque ibérique.» *Bull. Cent. Rech. Explor. Prod. Elf Aquitaine*, 20(1) : 131-195.
- Orbigny (d') A. (1847-1849) «Paléontologie française. Terrain crétacés IV.» Masson ed. Paris
- Pachoud, A. (1967). «Excursion en Provence suivant la réunion de la Société Géologique de France à Marseille du 22 mai 1967.» *Doc. Inédit. E.R.A.P.*, 5 p.
- Paquier, V. (1896). « Sur quelques rudistes nouveaux de l'Urgonien. » *Trav. Lab. Géol. Univ. Grenoble*. t. 4. fasc. 1 : 73-77
- Paquier, V. (1896). «Sur la présence de caprinidés dans l'Urgonien.» *Trav. Lab. Géol. Univ. Grenoble*. Vol. 4. N° 1 : 77-80
- Paquier, V. (1900). « Recherches géologiques dans le Diois et les Barronies orientales » Thèse, Univ. Grenoble, 402 p.
- Paquier, V. (1903). « Les rudistes urgoniens. » *Mém. Soc. Géol. Fr. (Paléontol.)*, Paris, vol. 29 : 5-102, 12 fig. 13 pl.
- Pelin, S. (1966). «Etude géologique du bassin de Pont-en-Royans.» Thèse, Grenoble, 59 p., 21 fig., 5 pl.
- Pellat, E. (1903). «Le Néocomien (Valenginien et Hauterivien) et le Barrémien entre Mons et Brouzet (Gard) ; quelques mots sur les faciès urgoniens de Martigues et d'Apt ; sur l'Aptien des environs d'Uzes, et le Barrémien de Lussan (Gard).» *Bull. Soc. Géol. France*, III, 4 : 119-127.
- Pellat, E. & Cossmann, M. (1907). «Le Barrémien supérieur de Brouzet.» *Mém. Soc. Géol. France, Paléont.*, XV, 37, 42 p.



- Peyaud, J. B., Barbarand, J., Carter, A., & Pagel, M. (2005). «Mid-Cretaceous uplift and erosion on the northern margin of the Ligurian Tethys deduced from thermal history reconstruction.» *International Journal of Earth Sciences*, 94(3) : 462-474.
- Pfender, J. (1932). «Sur la présence de *Natica leviathan* dans les calcaires portlandiens de la région de Marseille.» *C.R. Soc. Géol. France* : 117-118.
- Pfender, J. (1937). «A propos du Purbeckien du S.E. de la France.» *C.R. Soc. Géol. France* : 181-183
- Pfender, J. (1938). «Les foraminifères du Valanginien provençal.» *Bull. Soc. Géol. France*, 3, VIII : 231-240.
- Philip, J., Masse, J.L. & Machhour, L (1987). «L'évolution paléogéographique et structurale du front de chevauchement nord-toulonnais (Basse-Provence occidentale, France).» *Bull. Soc. géol., Fr.*, (8), III, 3 : 541-550.
- Planteblat, C., Arnaud-Vanneau, A., Adatte, T., Föllmi, K. B., Virgone, A., Bouillier, A.M. & Massonnat, G. (2012) «Dolomitization-dedolomitization events in the Urgonian Platform (Upper Barremian), southeastern France.» *Sedimentary Geology* (in progress).
- Posamentier, H. W. & Vail, P. R. (1988). «Eustatic controls on clastic deposition II - sequence and systems tract models.» *Sea-Level Changes: An Integrated Approach: SEPM, Special Publication 42*: 125-154.
- Rat P. (1988). «The Basque-Cantabrian basin between the Iberian and European plates : some facts but still many problems.» *Rev. Soc. Geol. España*, 1 : 327-348.
- Reboulet, S., Rawson, P. F., Moreno-Bedmar, J. A., Aguirre-Urreta, M. B., Barragán, R., Bogomolov, Y. & Szives, O. (2011). «Report on the 4th International Meeting of the IUGS Lower Cretaceous Ammonite Working Group, the "Kilian Group"»(Dijon, France, 30th August 2010). *Cretaceous Research*, 32(6) : 786-793.
- Reynes, P. (1861). «Etude sur le synchronisme et la délimitation des terrains crétacés du Sud-Est de la France.» E. Savy Edit., Paris, 115 p.
- Richet, R., Borgomano, J., Adams, E. W., Masse, J. P., & Viseur, S. (2011). «Numerical outcrop geology applied to stratigraphical modeling of ancient carbonate platforms: the

- Lower cretaceous Vercors carbonate platform (SE France).» Outcrops revitalized, Tools, Techniques and Applications. OJ Martinsen, A. Pulham, P. Haughton and M. Sullivan (Eds)., SEPM Spec. Publ, 10 : 195-210.
- Rivier, F. (1960). «Etude géologique des Monts de Vaucluse (Permis de Die).» Rapp. Int., C.O.P.E.F.A., (ined.), 31 p.
- Roch, E. (1927). «Etude stratigraphique et paléontologique de l'Aptien inférieur de la Bédoule (près Cassis, B. du Rh.)» Mém. Soc. Géol. France, N.S.4, IV, 1, 37 p.
- Roman, F. & Sayn G. (1904). « L'Hauterivien et le Barrémien de la rive droite du Rhône et du bas-Languedoc.» Bull. Soc. Géol. Fr., Paris, 4e série, vol. 4 : 607-640, 5 fig., 1 tabl.
- Royer, D. L. (2006). «CO<sub>2</sub>-forced climate thresholds during the Phanerozoic.» *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 5665–5675.
- Sano, S. I. (1992). «Petrographical and paleoecological analysis of the Urgonian facies' in Northeastern Japan and its paleogeographic implications.» In International geological congress.
- Sayn, G. (1892). «Des rapports qui existent entre le Néocomien des environs de Grenoble et celui de Combovin (Drôme).» Bull. Soc. Statist. Isère, Grenoble, série 4, t. 1.
- Schettino, A. & Turco, E. (2011). «Tectonic history of the western Tethys since the Late Triassic.» *Geological Society of America Bulletin*, 123(1-2) : 89-105.
- Serre (de), M. (1843). «Notes géologiques sur la Provence.» Act. Soc. Lin. Bordeaux 43, 90 p.
- Sibuet, J. C., Srivastava, S. P. & Spakman, W. (2004). «Pyrenean orogeny and plate kinematics.» *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* : 1978–2012, 109(B8).
- Souquet, P., Debroas, E. J., Boirie, J. M., Pons, P., Fixari, G., Roux, J. C., Dol, J., Thieuloy, J. P., Bonnemaison, M., Minvit, H. & Peybernès, B. (1985). «Le groupe du Flysch Noir (Albien-Cénomanién) dans les Pyrénées.» Bull. Centres Rech. Exp. Prod. Elf Aquitaine, 9 : 183-252.
- Sprovieri, M., Coccioni, R., Lirer, F., Pelosi, N. & Lozar, F. (2006). «Orbital tuning of a lower Cretaceous composite record (Maiolica Formation, central Italy).» *Paleoceanography* 21, PA4212.

- Stampfli, G. M. & Borel, G. D. (2002). « A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons » 196 : 17-33
- Stampfli, G. M. & Borel, G. D. (2004). « The TRANSMED Transects in Space and Time: Constraints on the Paleotectonic Evolution of the Mediterranean Domain. » The TRANSMED Atlas. The Mediterranean Region from Crust to Mantle, Springer Berlin Heidelberg : 53-80.
- Steuber, T., Rauch, M., Masse, J. P., Graaf, J., & Malkoč, M. (2005). «Low-latitude seasonality of Cretaceous temperatures in warm and cold episodes.» *Nature*, 437(7063) : 1341-1344.
- Thieuloy, J. P. (1959). « Etude micrographique des « calcaires à débris » barrémo-aptiens sur le pourtour méridional du Vercors.» *Trav. Lab. Géol. Univ. Grenoble*, t. 35 : 39-99, pl. I - XXV.
- Thieuloy, J. P. (1974). «The occurrence and distribution of boreal ammonites from the Neocomian of south-east France (Tethyeen Province).» *Geol.J., spec. issue*, 5 : 289-302.
- Thieuloy, J. P. & Girod, J. P. (1964). «L'Aptien et l'Albien fossilifères du synclinal d'Autrans (Vercors septentrional).» *Trav. Lab. Géol. Univ. Grenoble*, t. 40 : 92-111, pl. 2.
- Torcapel, A. (1882). «Sur l'Urgonien du Languedoc.» *Bull. Soc. Géol. France*, XI, 3 : 72-77.
- Torcapel, A. (1895). «Sur l'Urgonien de la Montagnette, près de Tarascon (B. du Rh.).» *Bull. Soc. Géol. France*, 3, XXIII : 155-159.
- Toucas, A. (1888). «Note sur le Jurrassique supérieur et le crétacé inférieur de la vallée du Rhône.» *Bull. Soc. Géol. France*, (3), 16, 903 p.
- Tucholke, B. E. & Sibuet, J. C. (2007). «Leg 210 synthesis: Tectonic, magmatic, and sedimentary evolution of the Newfoundland-Iberia rift.» In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, scientific results*, 210 : 1-56.
- Vail, P. R., Hardenbol, J. & Todd, R. G. (1984). «Jurassic unconformities, chronostratigraphy, and sea-level changes from seismic stratigraphy and biostratigraphy.»
- Van Buchem, F. S. P., Al-Husseini, M. I., Maurer, F., Droste, H. J. & Yose, L. A. (2010) «Sequence stratigraphic synthesis of the Barremian-Aptian of the eastern Arabian Plate:

- Implications for the petroleum habitat.» In: F.S.P. van Buchem, M.I. Al-Husseini, F. Maurer and H.J. Droste (Eds.), Barremian - Aptian stratigraphy and hydrocarbon habitat of the eastern Arabian Plate. GeoArabia Special Publication 4, Gulf PetroLink, Bahrain, 1 : 9-48.
- Van de Schootbrugge, B., Föllmi, K. B., Bulot, L. G. & Burns, S. J. (2000). «Paleoceanographic changes during the Early Cretaceous (Valanginian - Hauterivian): evidence from oxygen and carbon stable isotopes.» Earth and Planetary Science Letters 181 : 15-31.
- Vermeulen, J. (2005). «Boundaries, ammonite fauna and main subdivisions of the stratotype of the Barremian.» Géologie Alpine. Série spéciale «colloque et excursions» n°7.
- Viéban, F. (1983). «Installation et évolution de la plate-forme urgonienne (Hauterivian à Bédoulien) du Jura méridional aux chaînes subalpines (Ain, Savoie, Haute-Savoie).» Sédimentologie, minéralogie, stratigraphie et paléogéographie. Ph.D. Thesis. Grenoble, Université de Grenoble, 293 p.
- Warrlich, G., Amthor, J., Abu-Shiekah, I., Kharusi, A., Kindy, M. & Garimella, S. (2011). «Adjusting modeling methodologies to decision requirements, reservoir properties and recovery mechanism – Examples from the Shuaiba in Oman.» SPE, SPE-148265, 19 p.
- Weydert, P. (1965). «Etude des lithofaciès du plateau de Saint-Christol (Vaucluse). Relations et influences sur le modèle karstique.» Ann. Fac. Sci. Marseille, XXXVII : 81-102.
- Yose, L. A., Strohmenger, C. J., Al-Hosani, I., Bloch, G. & Al-Mehairi, Y. (2010). «Sequence-stratigraphic evolution of an Aptian carbonate platform (Shu'aiba Formation), eastern Arabian Plate, onshore Abu Dhabi, United Arab Emirates.» In: F.S.P. van Buchem, M. I. Al- Husseini, F. Maurer and H. J. Droste (Eds.), Barremian - Aptian stratigraphy and hydrocarbon habitat of the eastern Arabian Plate. GeoArabia Special Publication 4, Gulf PetroLink, Bahrain, 2 : 309-340.
- Ziegler, P. A. (1999). «Evolution of the Arctic-North Atlantic and the Western Tethys.» AAPG Memoir 43 : 164-196.
- Zürcher, P. (1890). «Note sur la continuation de la chaîne de la Sainte-Baume.» Bull. Serv. Carte Géol. France, II, 18 : 321-336.





# Chapitre 8 Annexes





# TABLE DES MATIÈRES

<b>Annexes :</b>	<b>I</b>
<b>A1 LES LOGS STRATIGRAPHIQUES.....</b>	<b>VII</b>
<b>A2 LES CARTES D'ÉPAISSEUR, D'ÉROSION ET DE PALÉO-PROFONDEUR D'EAU....</b>	<b>LXXXI</b>
<b>A3 RÉSUMÉS POUR DES PARTICIPATIONS AUX CONGRÈS .....</b>	<b>CX</b>
A3•1 GFC - 5ÈME RÉUNION THÉMATIQUE – PARIS 2009.....	CX
A3•2 FORAMS 2010, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FORAMINIFERA, BONN, GERMANY.....	CXII
A3•3 IAS 2011, METTING OF SEDIMENTOLOGISTS, ZARAGOZA, SPAIN .....	CXIV
A3•4 GEO 2012, THE 10 <sup>TH</sup> MIDDLE-EAST GEOSCIENCES CONFERENCE, MANAMA, BAHREIN .....	CXVI
A3•5 SWISSSED, 20 <sup>TH</sup> MEETING, FRIBOURG, SUISSE .....	CXVII
A3•6 EGU 2012, GENERAL ASSEMBLY, VIENNA, AUSTRIA .....	CXX
A3•7 ADIPEC 2012, ABU DHABI, UNITED ARABIAN EMIRATES .....	CXXII
A3•8 IAS 2012, METTING OF SEDIMENTOLOGISTS, SCHLADMING, AUSTRIA	CXXXVII

# LISTE DES FIGURES

Annexe 1 : Log stratigraphique de la coupe de l'Aven de Cal (Gard). .....	7
Annexe 2: Log stratigraphique de la coupe de l'Aven de l'Agas (Gard). .....	8
Annexe 3: Log stratigraphique de la coupe de La Baume (Gard). .....	9
Annexe 4: Log stratigraphique de la coupe des Angostrines (Gard).....	10
Annexe 5: Log stratigraphique de la coupe du Mont Bouquet (Gard).....	11
Annexe 6: Log stratigraphique de la coupe de Navacelles (Gard). .....	12
Annexe 7: Log stratigraphique de la coupe de Sauzet (Gard). .....	13
Annexe 8: Log stratigraphique du puits de Belvezet (Gard).....	14
Annexe 9: Log stratigraphique du puits de Collias (Gard). .....	15
Annexe 10: Log stratigraphique du puits de Collias 2 (Gard).....	16
Annexe 11: Log stratigraphique du puits de Combas (Gard).....	17
Annexe 12: Log stratigraphique du puits de Connaux (Gard).....	18
Annexe 13: Log stratigraphique du puits de Flaux (Gard). .....	20
Annexe 14: Log stratigraphique du puits de Flaux 2 (Gard). .....	21
Annexe 15: Log stratigraphique du puits du Blanquau (Gard). .....	22
Annexe 16: Log stratigraphique du puits de Fontarèche (Gard).....	24
Annexe 17: Log stratigraphique du puits de Lembarnès (Gard).....	25
Annexe 18: Log stratigraphique du puits de Saint-Anastasie (Gard).....	26
Annexe 19: Log stratigraphique du puits de Sagries (Gard).....	28
Annexe 20: Sommet du log stratigraphique du puits de Serviers (Gard). .....	29
Annexe 21: base du log stratigraphique du puits de Serviers (Gard). .....	30
Annexe 22: Log stratigraphique du puits d'Uzes (Gard).....	32
Annexe 23: Log stratigraphique du puits de Verfeuil (Gard). .....	34
Annexe 24: Log stratigraphique du puits de Saint-Maximin (Gard).....	35

Annexe 25: Log stratigraphique de la coupe d'Aiguèze (Ardèche).....	36
Annexe 26: Log stratigraphique de la coupe d'Autridge (Ardèche).....	37
Annexe 27: Log stratigraphique de la coupe du Col de la Serre (Ardèche).....	38
Annexe 28: Log stratigraphique de la coupe de Chames (Ardèche). ....	40
Annexe 29: Log stratigraphique de la coupe de Font Vive (Ardèche).....	41
Annexe 30: Sommet du log stratigraphique de la coupe de Pont de Laval (Ardèche).....	42
Annexe 31: Partie centrale du log stratigraphique de la coupe de Pont de Laval (Ardèche). ....	43
Annexe 32: Base du log stratigraphique de la coupe de Pont de Laval (Ardèche).....	44
Annexe 33: Log stratigraphique de la coupe de Rouvière (Ardèche).....	46
Annexe 34: Log stratigraphique de la coupe de Serrou (Ardèche).....	48
Annexe 35: Log stratigraphique de la coupe de Saint-Marcel (Ardèche). ....	49
Annexe 36: Log stratigraphique de la coupe de Viviers gare (Ardèche).....	50
Annexe 37: Log stratigraphique de la coupe de Viviers Saint Montant (Ardèche). ....	51
Annexe 38: Sommet du log stratigraphique du Puits du Garn (Ardèche). ....	52
Annexe 39: Base du log stratigraphique du Puits du Garn (Ardèche). ....	53
Annexe 40: Log stratigraphique du Puits de Barjac (Ardèche).....	56
Annexe 41: Sommet du log stratigraphique de la coupe de la Candelle(Provence).....	57
Annexe 42: Base du log stratigraphique de la coupe de la Candelle (Provence). ....	58
Annexe 43: Log stratigraphique de la coupe du Devenson (Provence). ....	60
Annexe 44: Log stratigraphique de la coupe des Goudes (Provence). ....	61
Annexe 45: Log stratigraphique de la coupe de Port-Miou (Provence).....	62
Annexe 46: Sommet du log stratigraphique de la coupe de Cire-Nesque (Vaucluse).....	63
Annexe 47: Base du log stratigraphique de la coupe de Cire-Nesque (Vaucluse). ....	64
Annexe 48: Log stratigraphique de la coupe de Fontaine (Vaucluse).....	66
Annexe 49: Log stratigraphique du puits d'Orgon (Vaucluse). ....	68
Annexe 50: Log stratigraphique de la coupe de Rustrel (Vaucluse).....	69

Annexe 51: Log stratigraphique de la coupe du Fâ (Vercors).....	70
Annexe 52: Log stratigraphique de la coupe de Lachau (Vercors). ....	72
Annexe 53: Log stratigraphique de la coupe du Mortier (Vercors).....	74
Annexe 54: Log stratigraphique de la coupe du Nan (Vercors). ....	76
Annexe 55: Log stratigraphique de la coupe de Saint Vincent de la Commanderie (Vercors)..	78
Annexe 56: Log stratigraphique de la coupe de Fogés (Vercors). ....	79
Annexe 57 : Carte d'épaisseur du cortège de bas niveau de la séquence Ba3. ....	80
Annexe 58 : Carte d'épaisseur du cortège transgressif de la séquence Ba3. ....	81
Annexe 59 : Carte d'épaisseur du cortège de haut niveau de la séquence Ba3. ....	82
Annexe 60 : Carte d'épaisseur du cortège de bas niveau de la séquence Ba4. ....	83
Annexe 61 : Carte d'épaisseur du cortège transgressif de la séquence Ba4. ....	84
Annexe 62 : Carte d'épaisseur du cortège de haut niveau de la séquence Ba4. ....	85
Annexe 63 : Carte d'épaisseur du cortège de bas niveau de la séquence Ba5. ....	86
Annexe 64 : Carte d'épaisseur du cortège transgressif de la séquence Ba5. ....	87
Annexe 65 : Carte d'épaisseur du cortège de haut niveau de la séquence Ba5. ....	88
Annexe 66 : Carte d'épaisseur du cortège de bas niveau de la séquence A1. ....	89
Annexe 67 : Carte d'épaisseur du cortège transgressif de la séquence A1. ....	90
Annexe 68 : Carte d'épaisseur du cortège de haut niveau de la séquence A1. ....	91
Annexe 69 : Carte des épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence Ba3 érodés au niveau de la limite de la séquence Ba4.....	92
Annexe 70 : Carte des épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence Ba4 érodés au niveau de la limite de la séquence Ba5.....	93
Annexe 71 : Carte des épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence Ba5 érodés au niveau de la limite de la séquence A1. ....	94
Annexe 72 : Carte des épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence A1 érodés au niveau de la limite de séquence A2. ....	95
Annexe 73 : Carte de paléoprofondeur d'eau à la base de la séquence Ba3. ....	96

Annexe 74 : Carte de paléoprofondeur d'eau au niveau de la surface transgressive de la séquence Ba3.....	97
Annexe 75 : Carte de paléoprofondeur d'eau au niveau la surface d'inondation maximum de la séquence Ba3. ....	98
Annexe 76 : Carte de paléoprofondeur d'eau au sommet de la séquence Ba3, au niveau de la limite de séquence Ba4. ....	99
Annexe 77 : Carte de paléoprofondeur d'eau au niveau de la surface transgressive de la séquence Ba4.....	100
Annexe 78 : Carte de paléoprofondeur d'eau au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba4.....	101
Annexe 79 : Carte de paléoprofondeur d'eau au sommet de la séquence Ba4, au niveau de la limite de séquence Ba5. ....	102
Annexe 80 : Carte de paléoprofondeur d'eau au niveau de la surface transgressive de la séquence Ba5.....	103
Annexe 81 : Carte de paléoprofondeur d'eau au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence Ba5.....	104
Annexe 82 : Carte de paléoprofondeur d'eau au sommet de la séquence Ba5, au niveau de la limite de la séquence A1.....	105
Annexe 83 : Carte de paléoprofondeur d'eau au niveau de la surface transgressive de la séquence A1. ....	106
Annexe 84 : Carte de paléoprofondeur d'eau au niveau de la surface d'inondation maximum de la séquence A1.....	107
Annexe 85 : Carte de paléoprofondeur d'eau au sommet de la séquence A1, au niveau de la limite de séquence A2.....	108





# 1 LES LOGS STRATIGRAPHIQUES

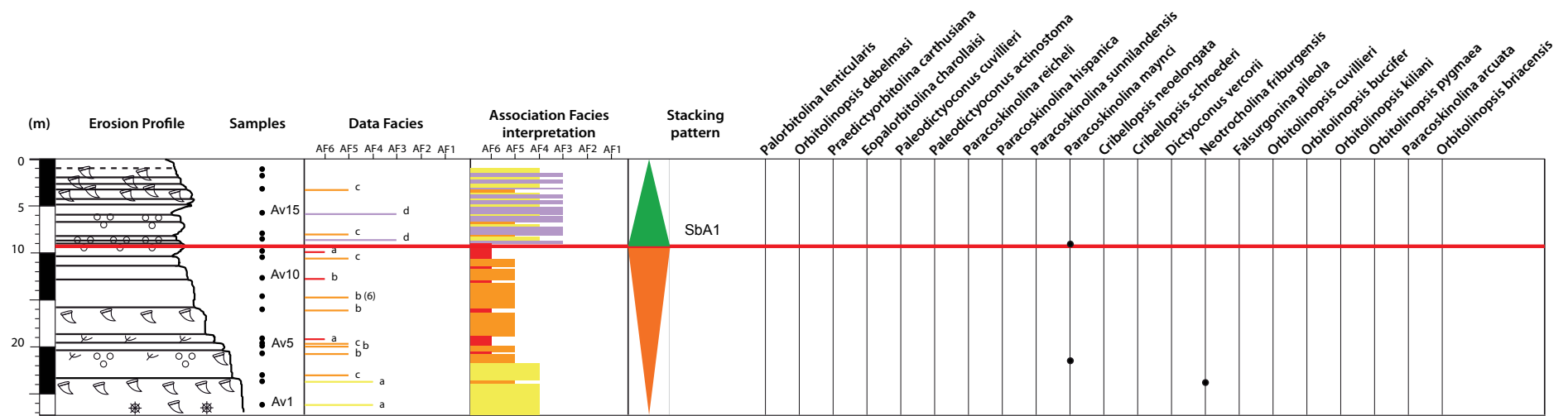
Les figures suivantes représentent les logs stratigraphiques de chaque coupes et puits étudiées tout au long de cette étude.

Pour les coupes, sont représentées de gauche à droite : un profil d'érosion sur lequel la macro-faune observée sur le terrain ainsi que les limites de bancs ont été représentés ; la position des échantillons prélevés ; le micro faciès observé en lame mince ; l'interprétation de la répartition des associations de faciès sur l'ensemble de la coupe ; le découpage stratigraphique déterminé ; et la micro-faune observées en lame mince.

Pour les puits, sont représentés de gauche à droite : l'épaisseur de calcaire forée par échantillon de boue de forage prélevée ; le micro-faciès observé en lame mince ; le découpage stratigraphique déterminé ; et la micro-faune observée en lame mince.

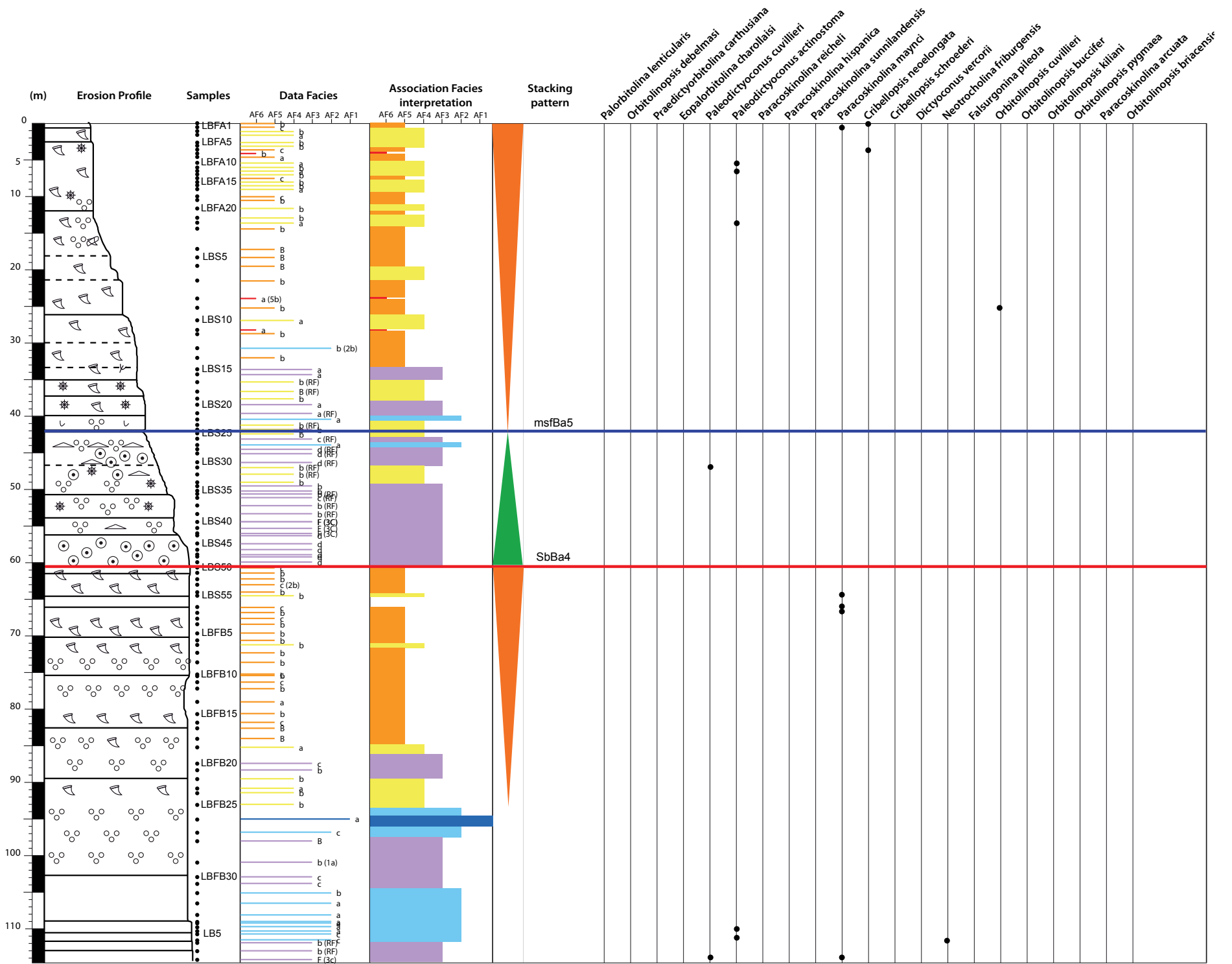
La détermination de la microfaune des coupes du Vercors n'a pas été reprise dans cette étude c'est pourquoi leurs répartitions n'apparaît pas sur les logs.

Ci-dessous, la légende des symboles utilisés sur le profil d'érosion.

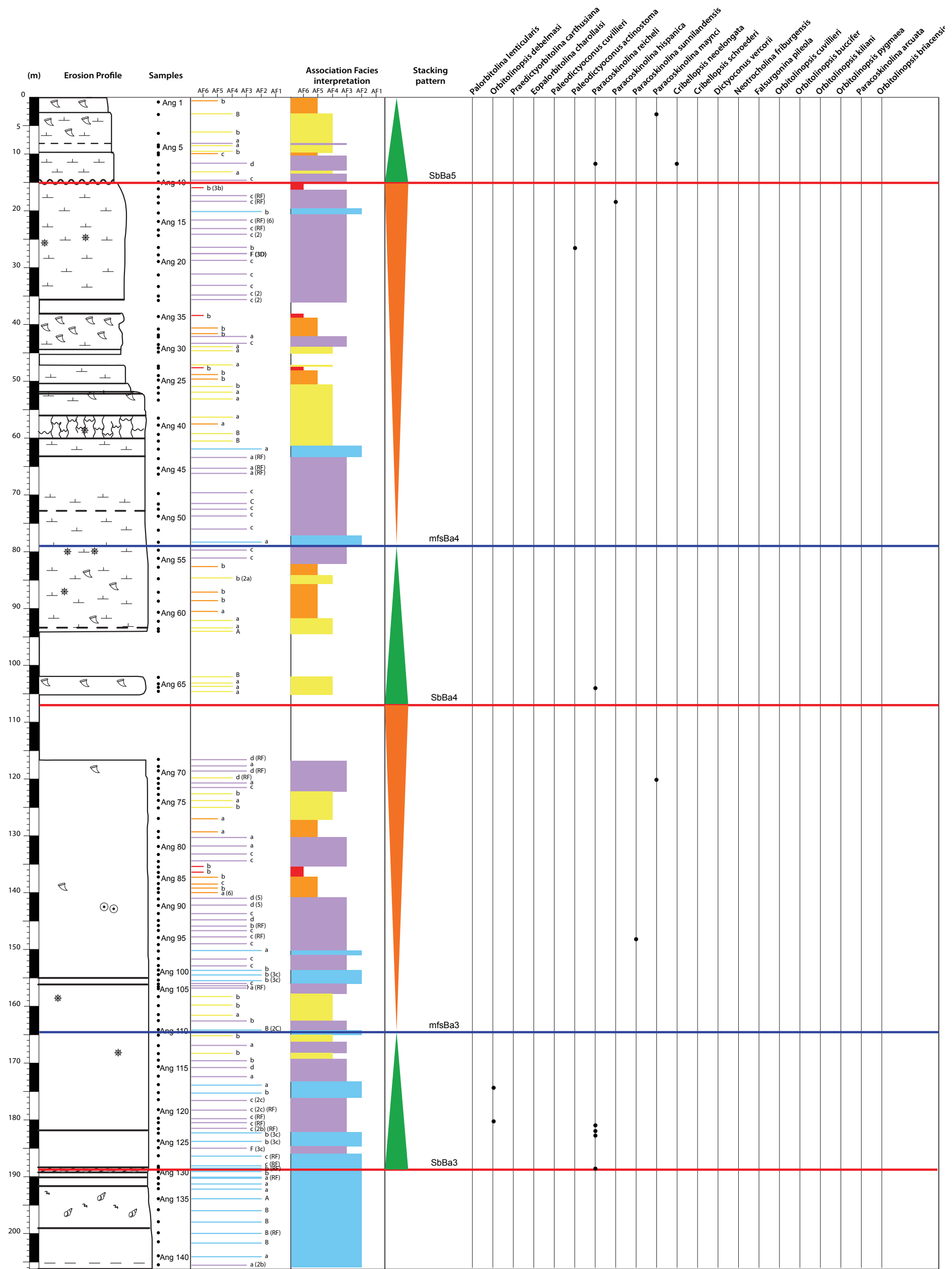


Annexe 5 : Log stratigraphique de la coupe de l'Aven de Cal (Gard).

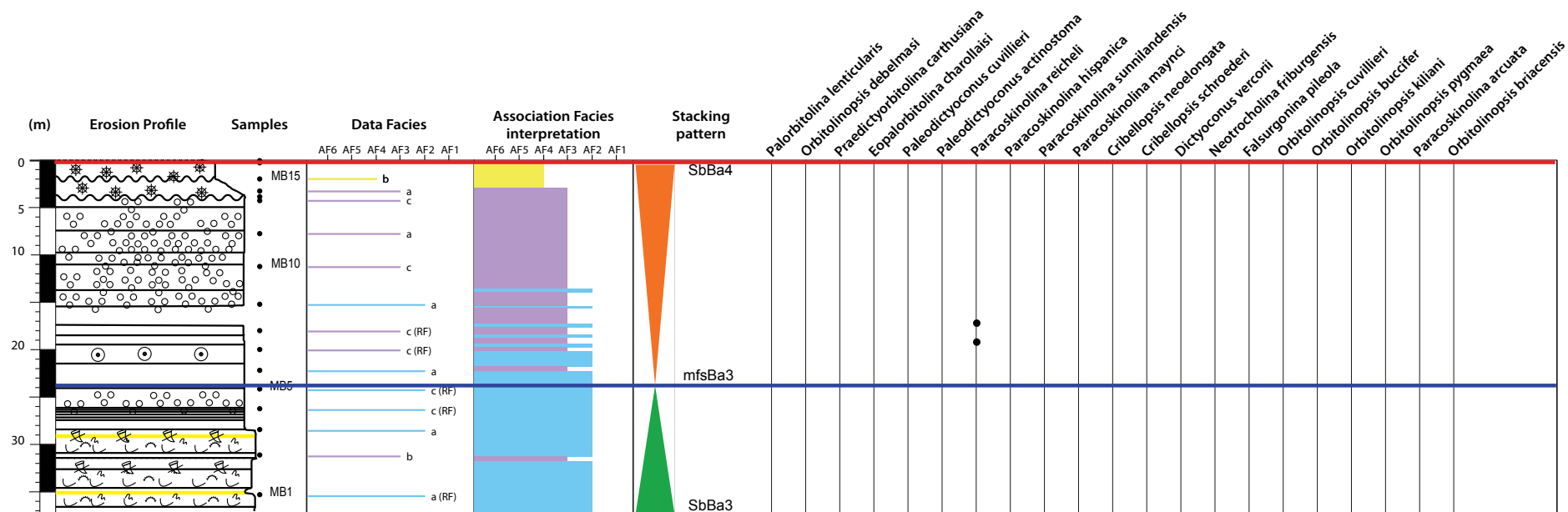




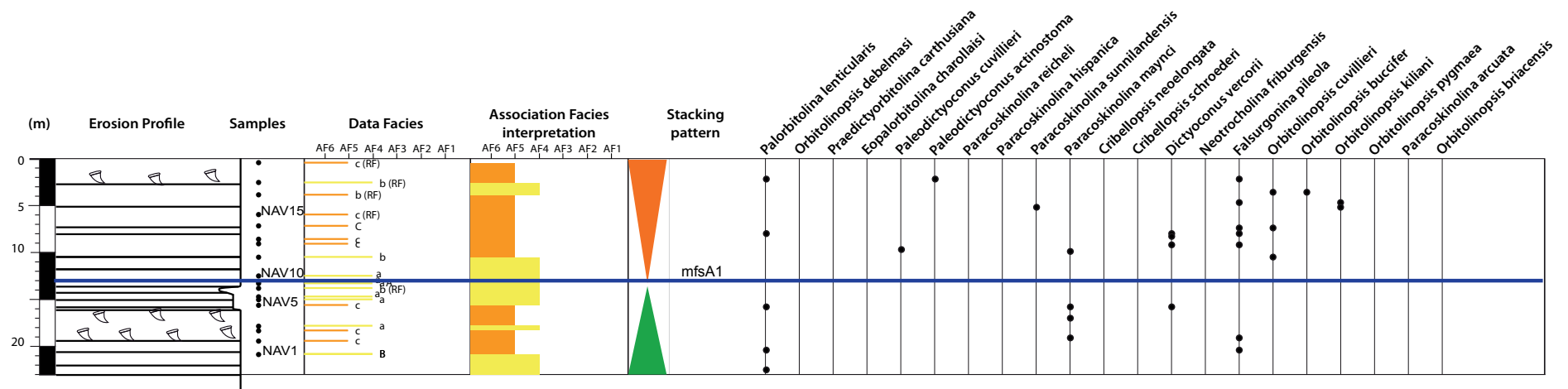
Annexe 7: Log stratigraphique de la coupe de La Baume (Gard).



Annexe 8: Log stratigraphique de la coupe des Angostrines (Gard).

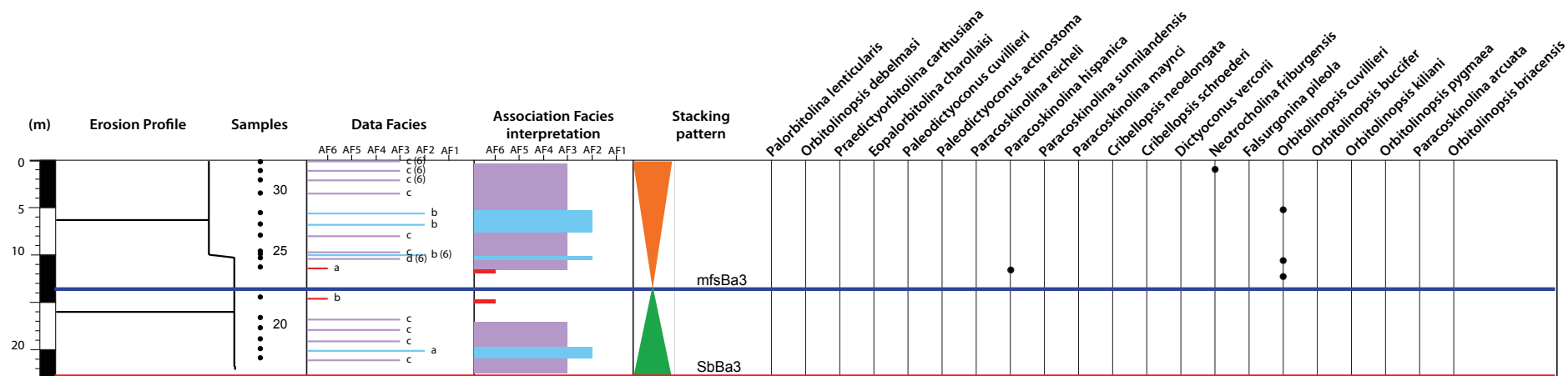


Annexe 9: Log stratigraphique de la coupe du Mont Bouquet (Gard).

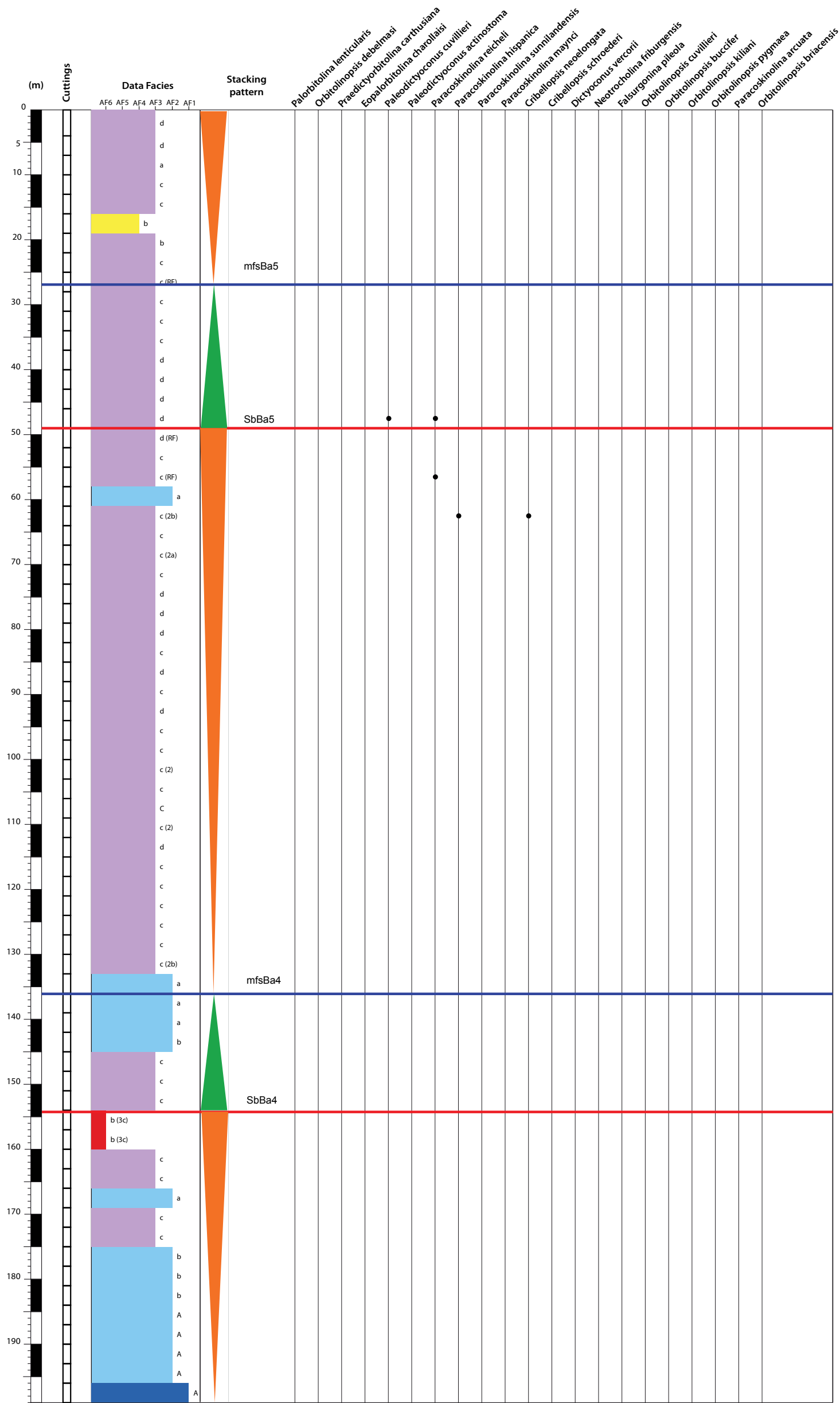


Annexe 10: Log stratigraphique de la coupe de Navacelles (Gard).

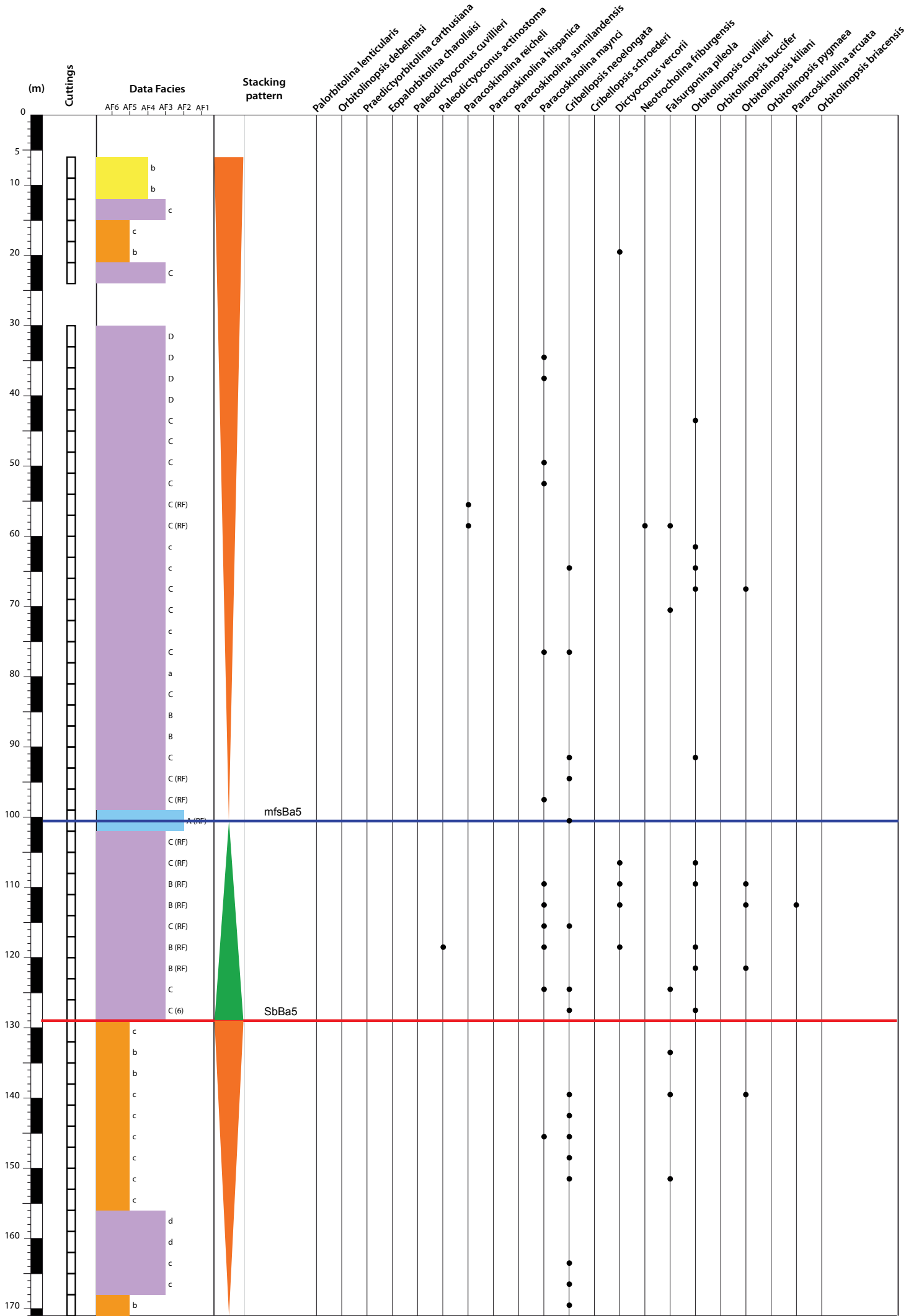




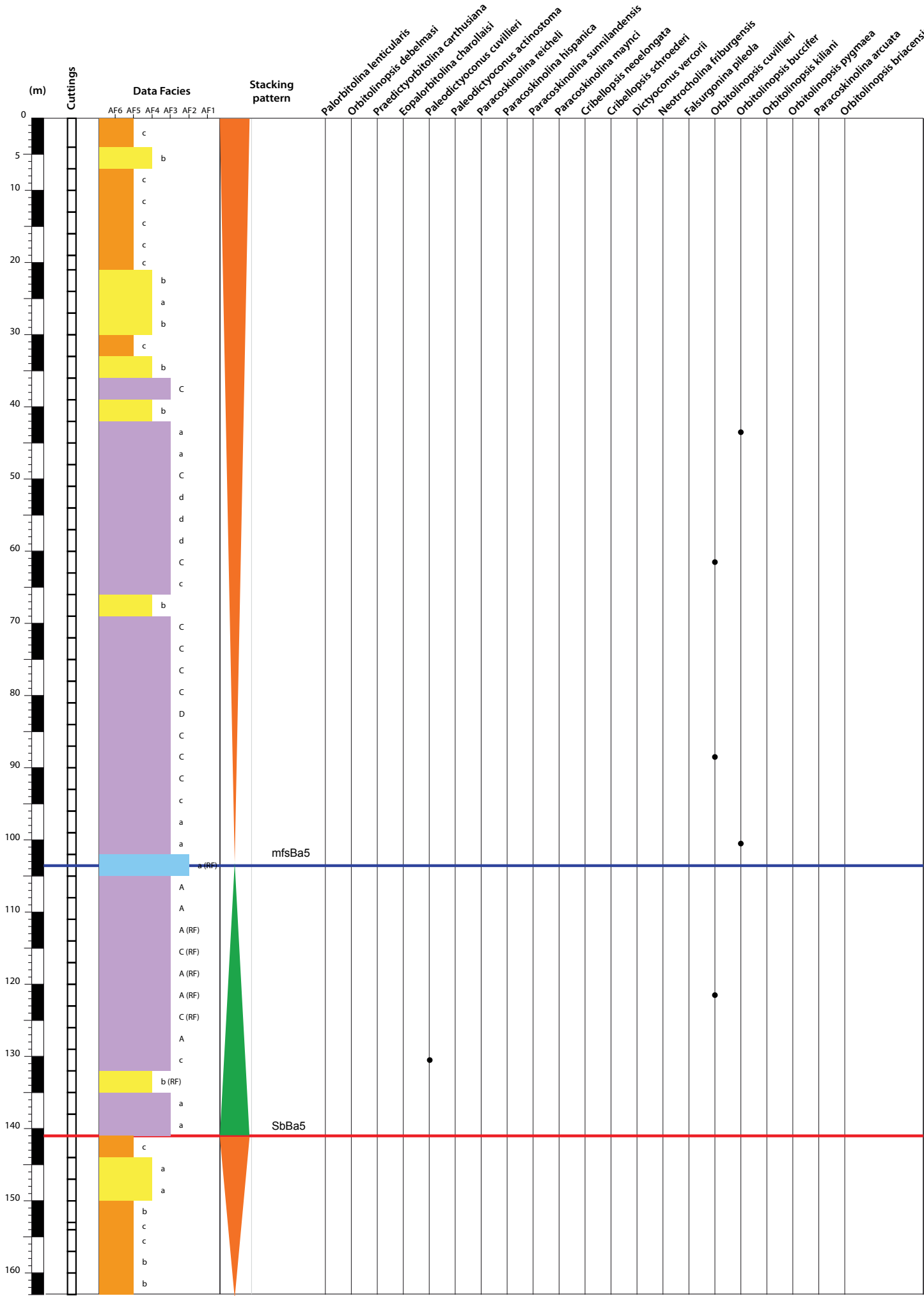
Annexe 11: Log stratigraphique de la coupe de Sauzet (Gard).



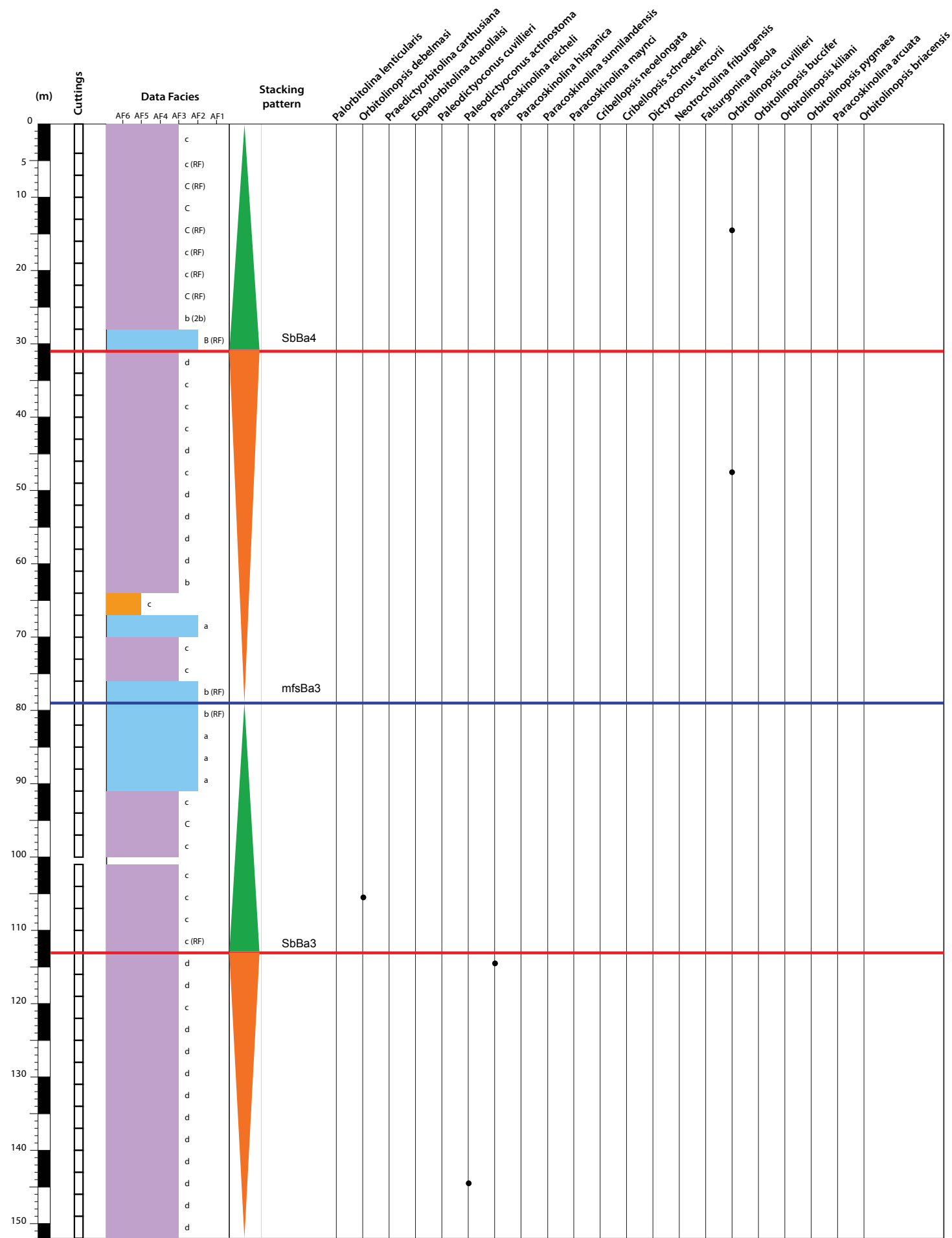
Annexe 12: Log stratigraphique du puits de Belvezet (Gard).



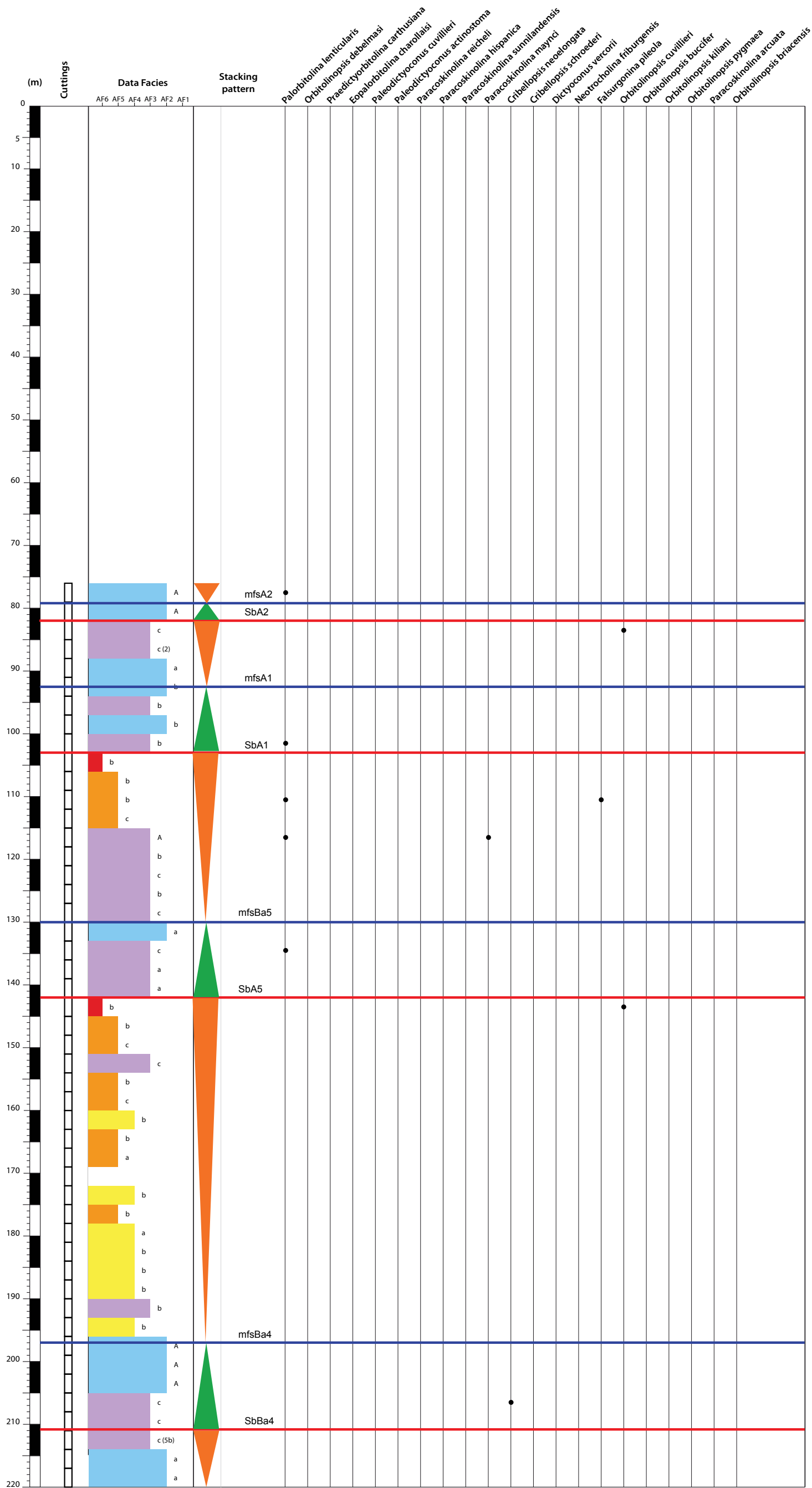
Annexe 13: Log stratigraphique du puits de Collias (Gard).



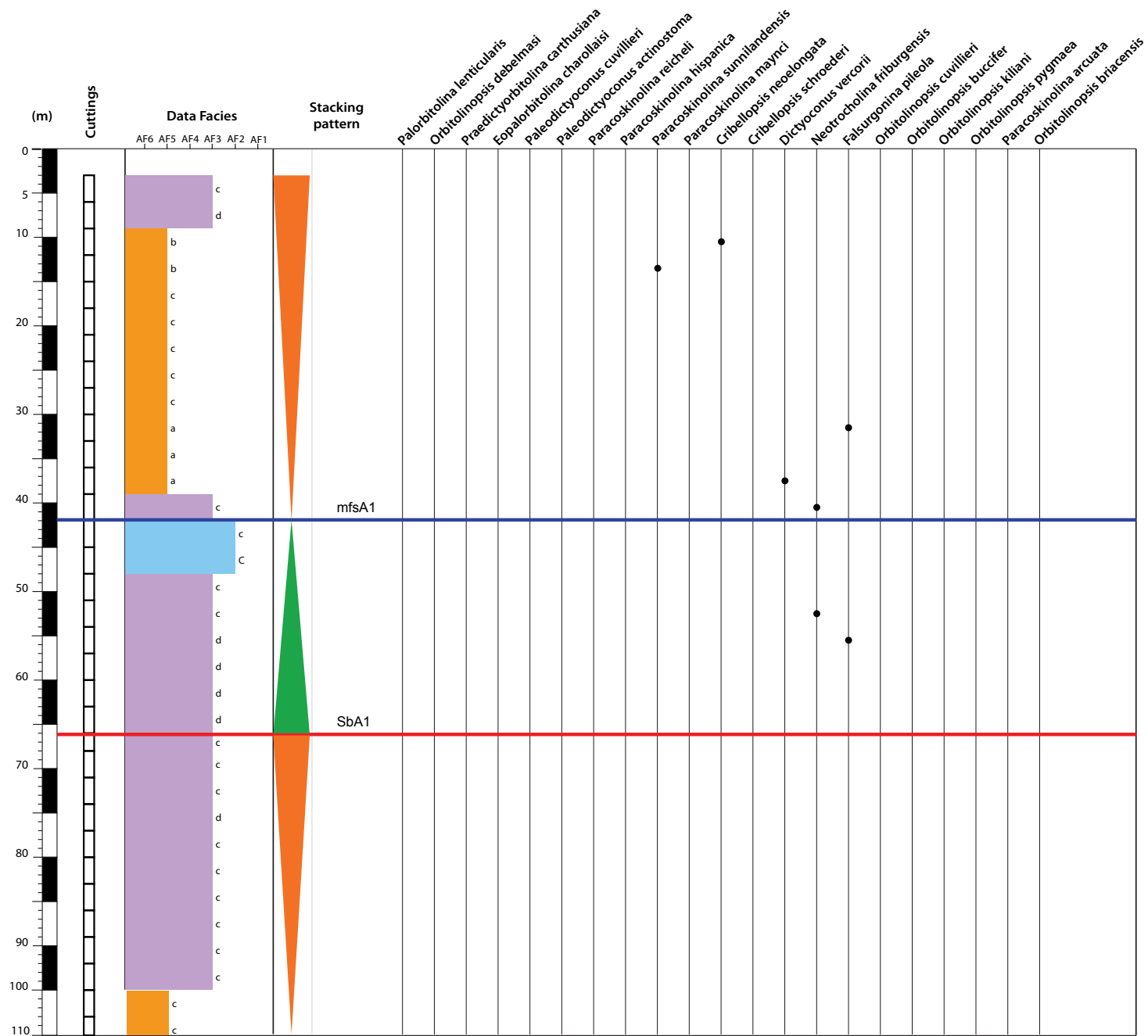
Annexe 14: Log stratigraphique du puits de Collias 2 (Gard).



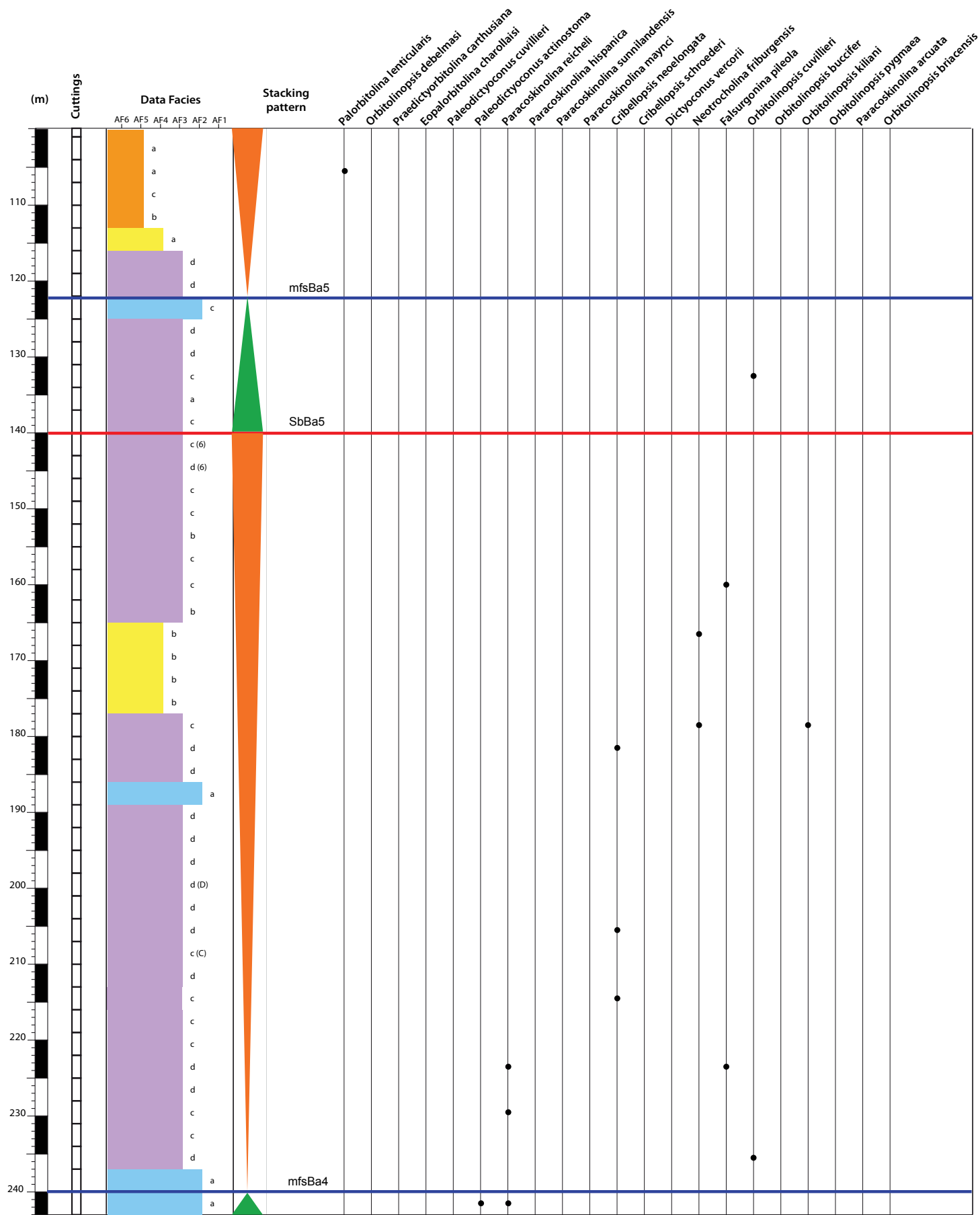
Annexe 15: Log stratigraphique du puits de Combas (Gard).



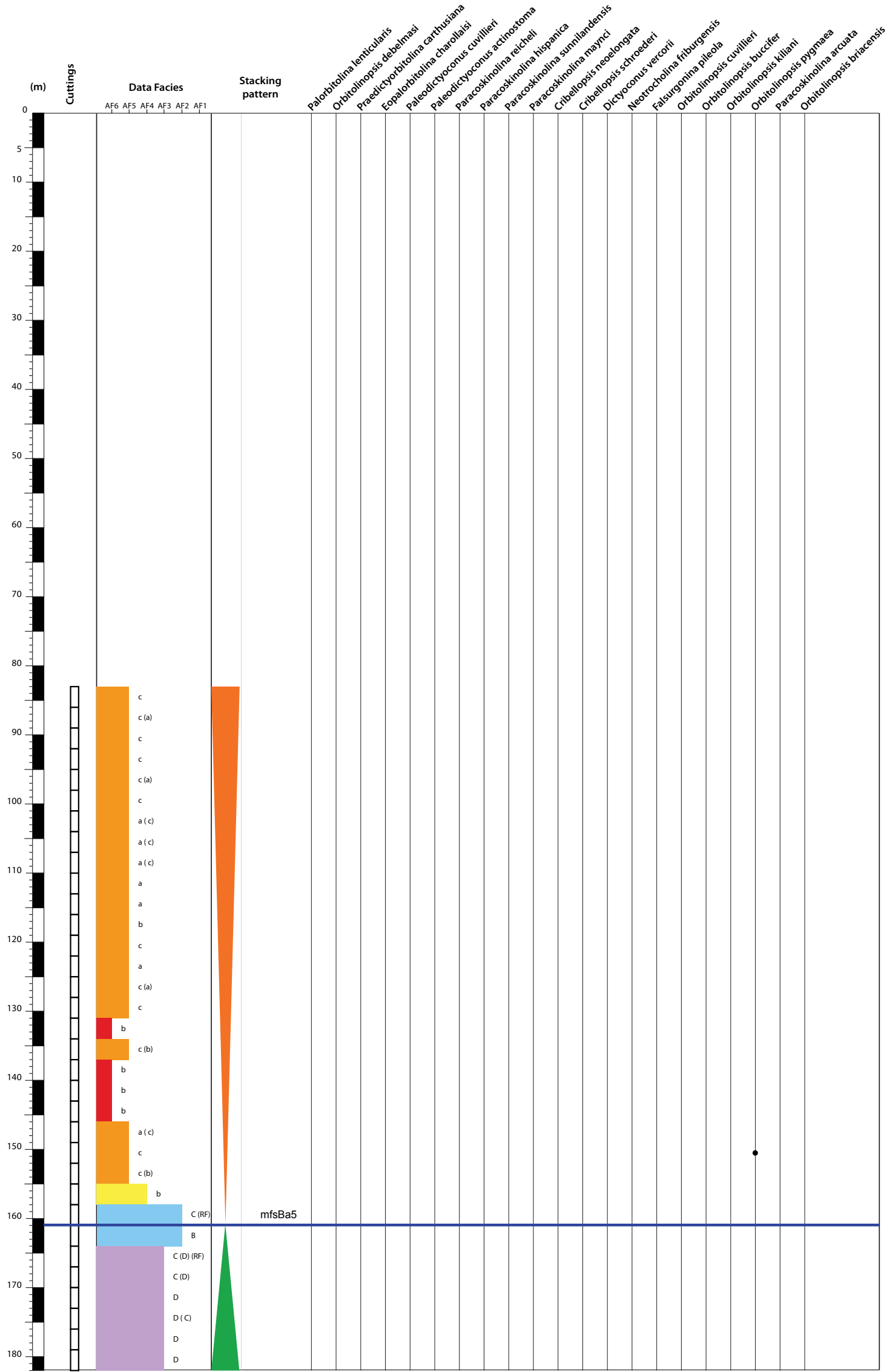
Annexe 16: Log stratigraphique du puits de Connaux (Gard).



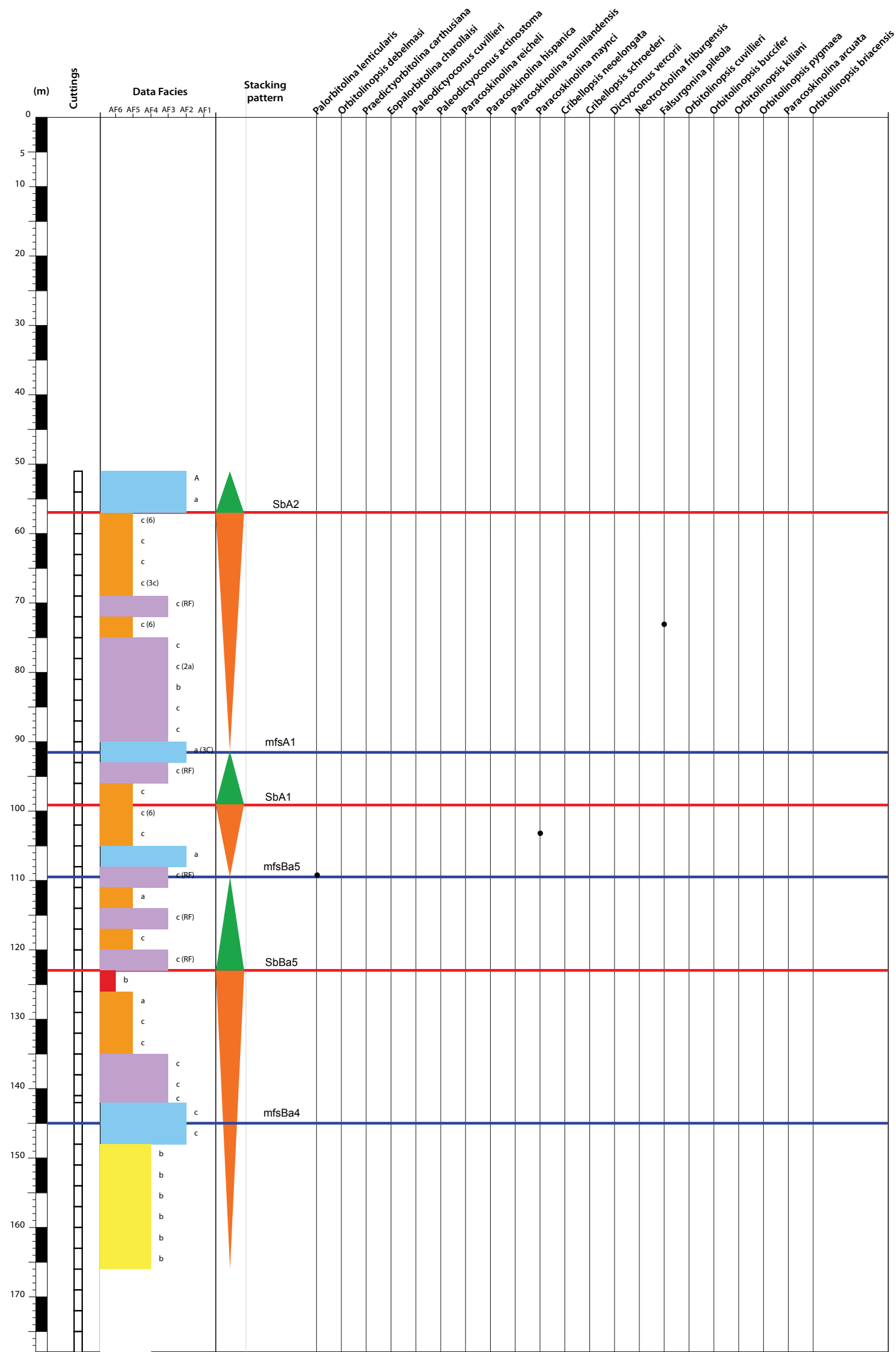




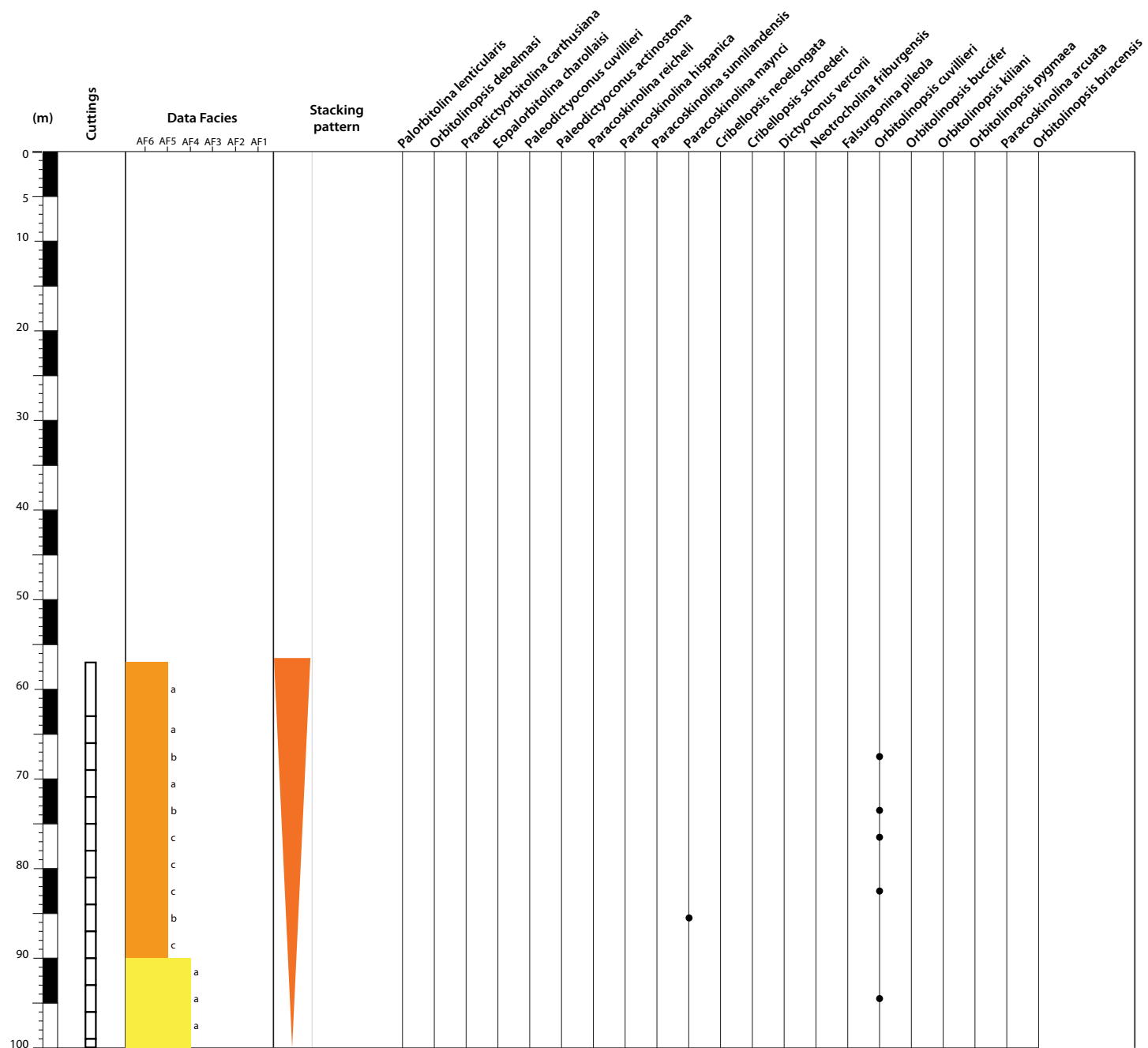
Annexe 17: Log stratigraphique du puits de Flaux (Gard).

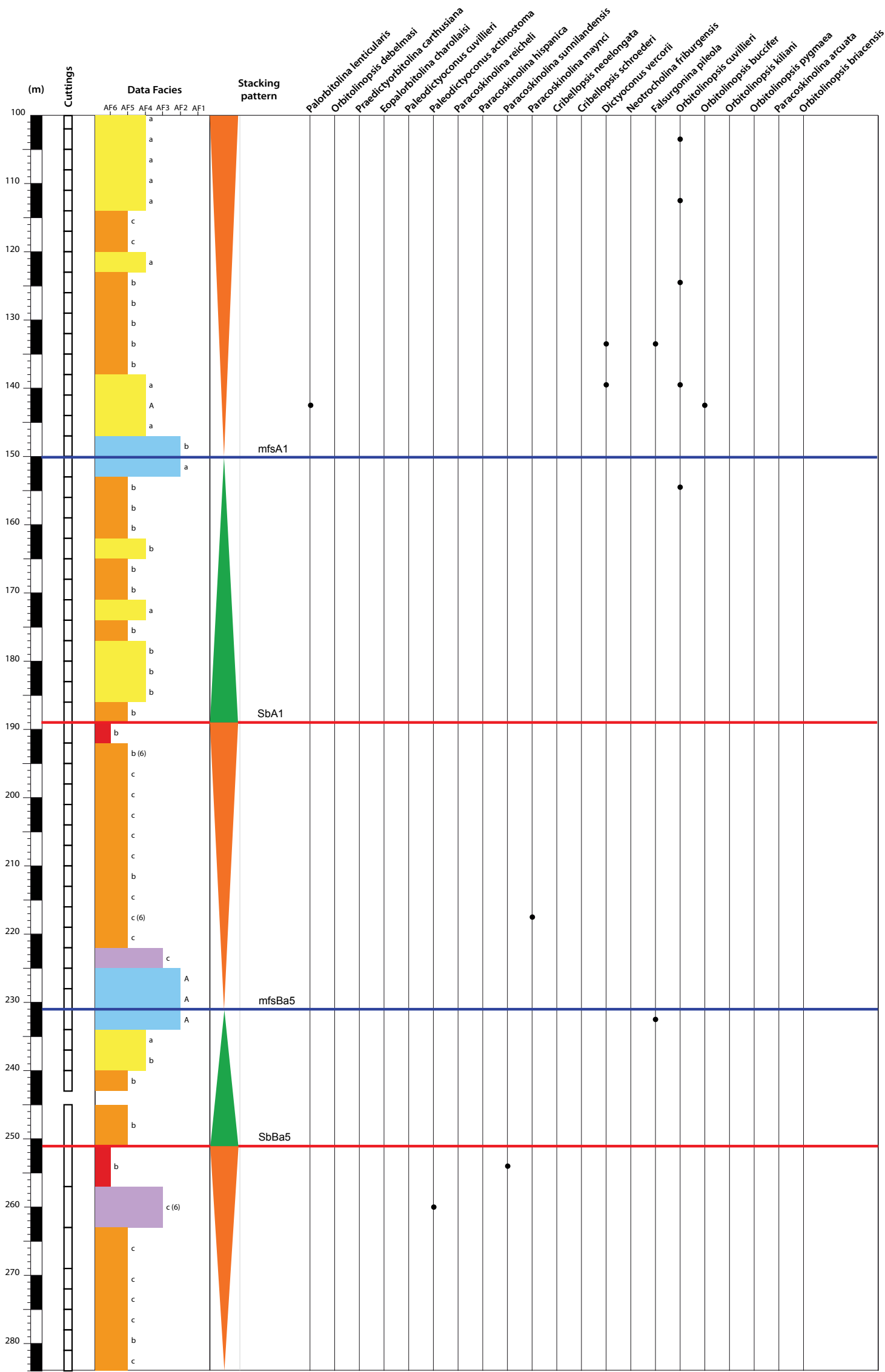


Annexe 18: Log stratigraphique du puits de Flaux 2 (Gard).

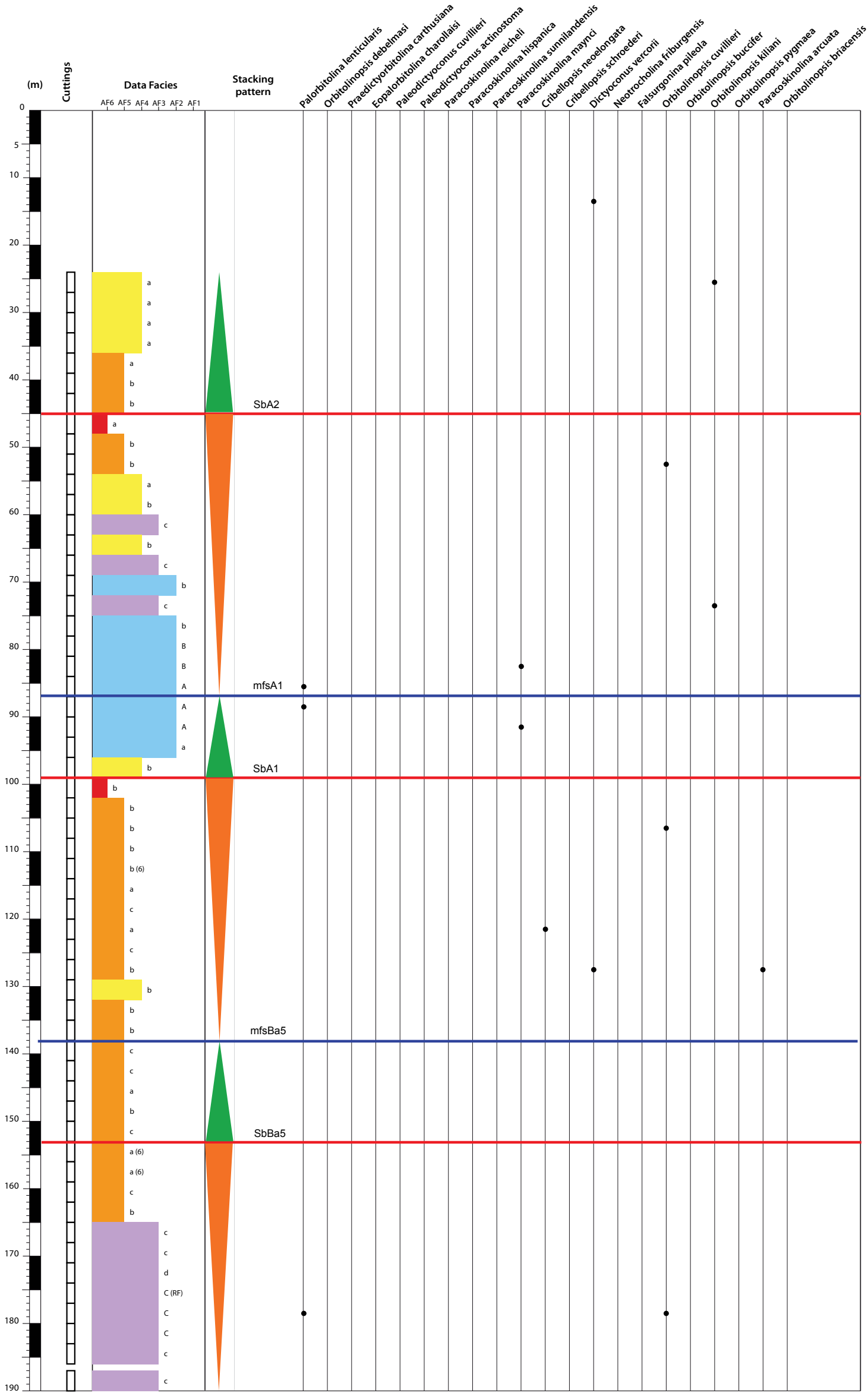


Annexe 19: Log stratigraphique du puits du Blanquau (Gard).

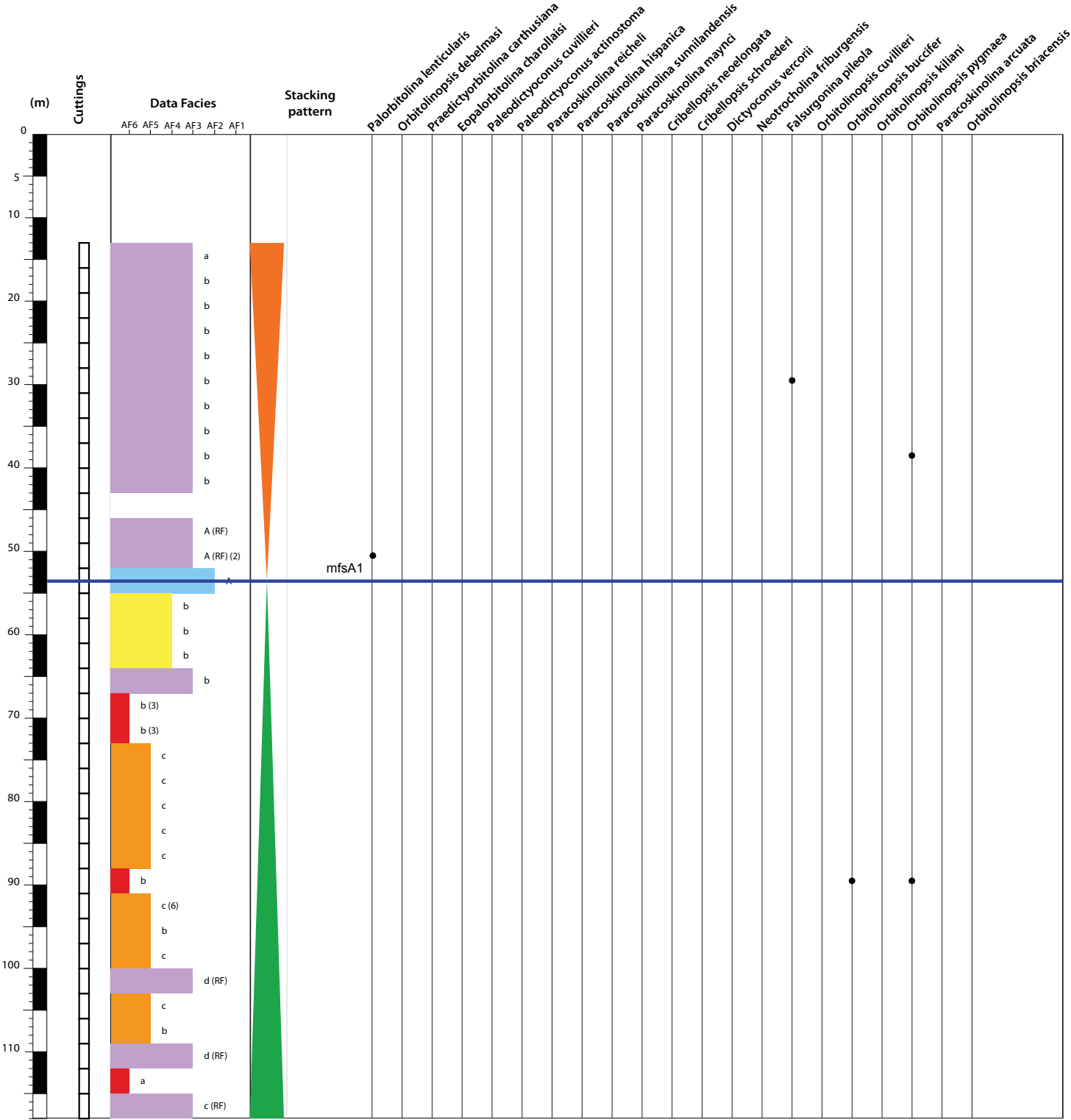




Annexe 20: Log stratigraphique du puits de Fontarèche (Gard).

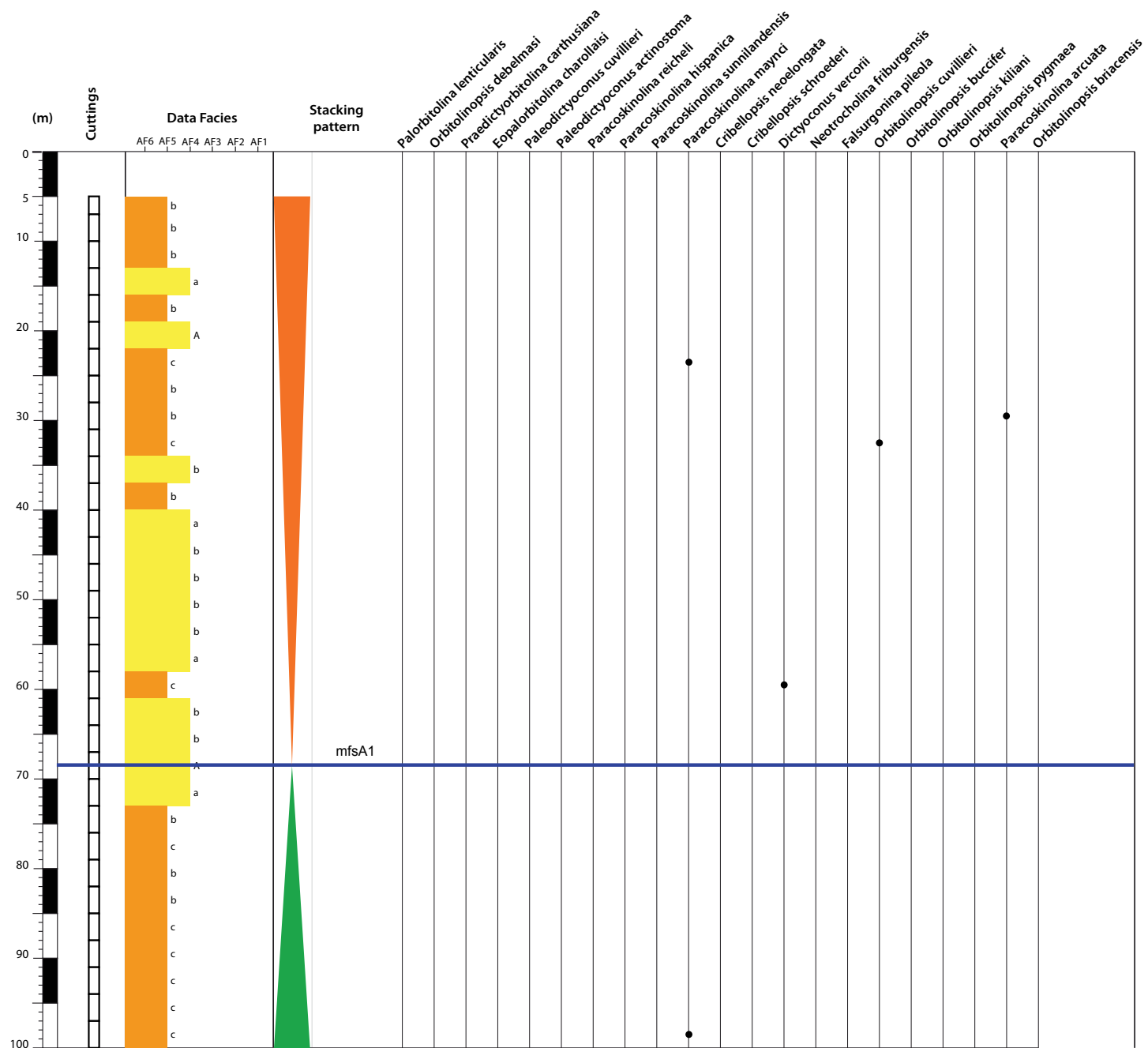


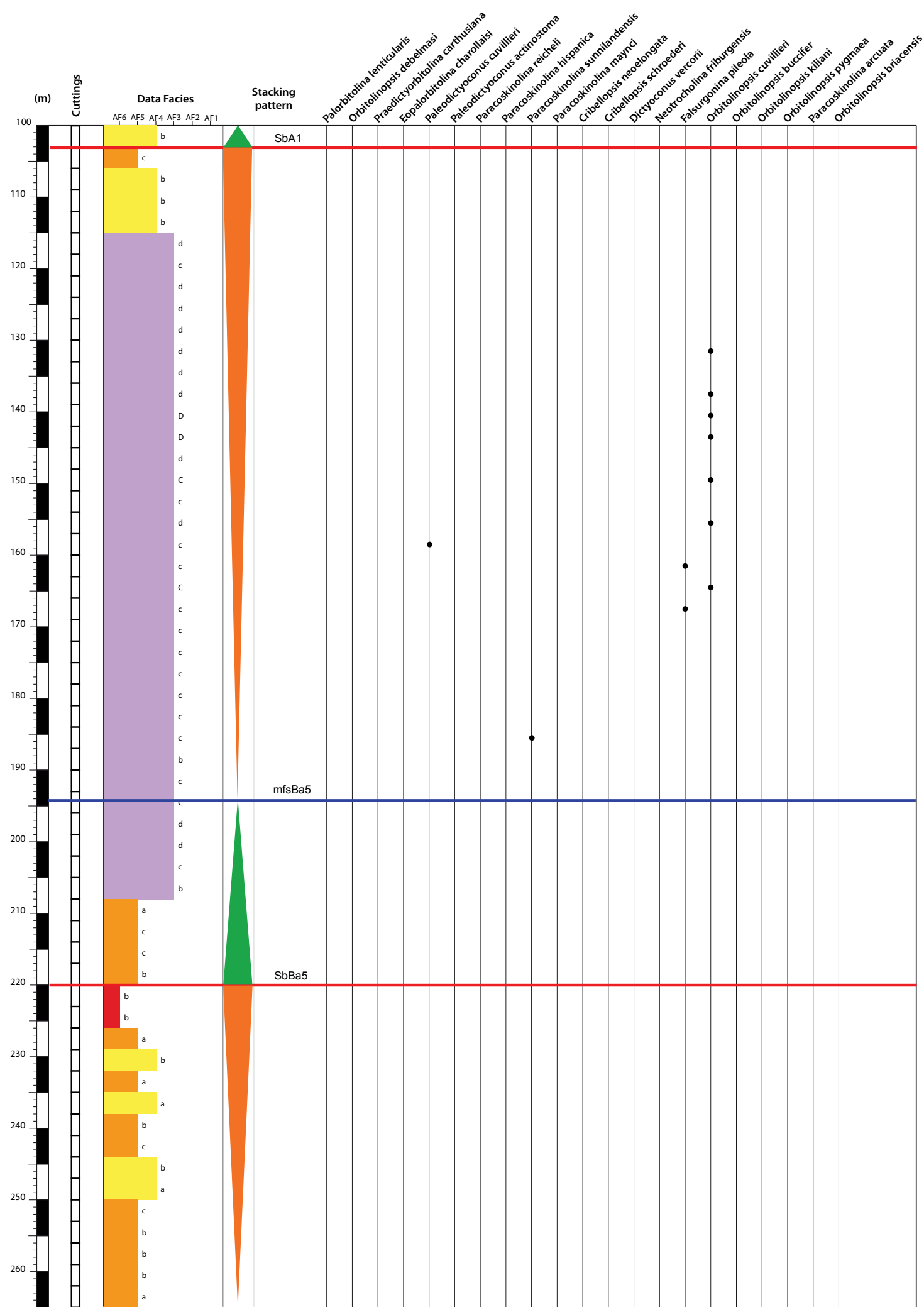
Annexe 21: Log stratigraphique du puits de Lembarne (Gard).



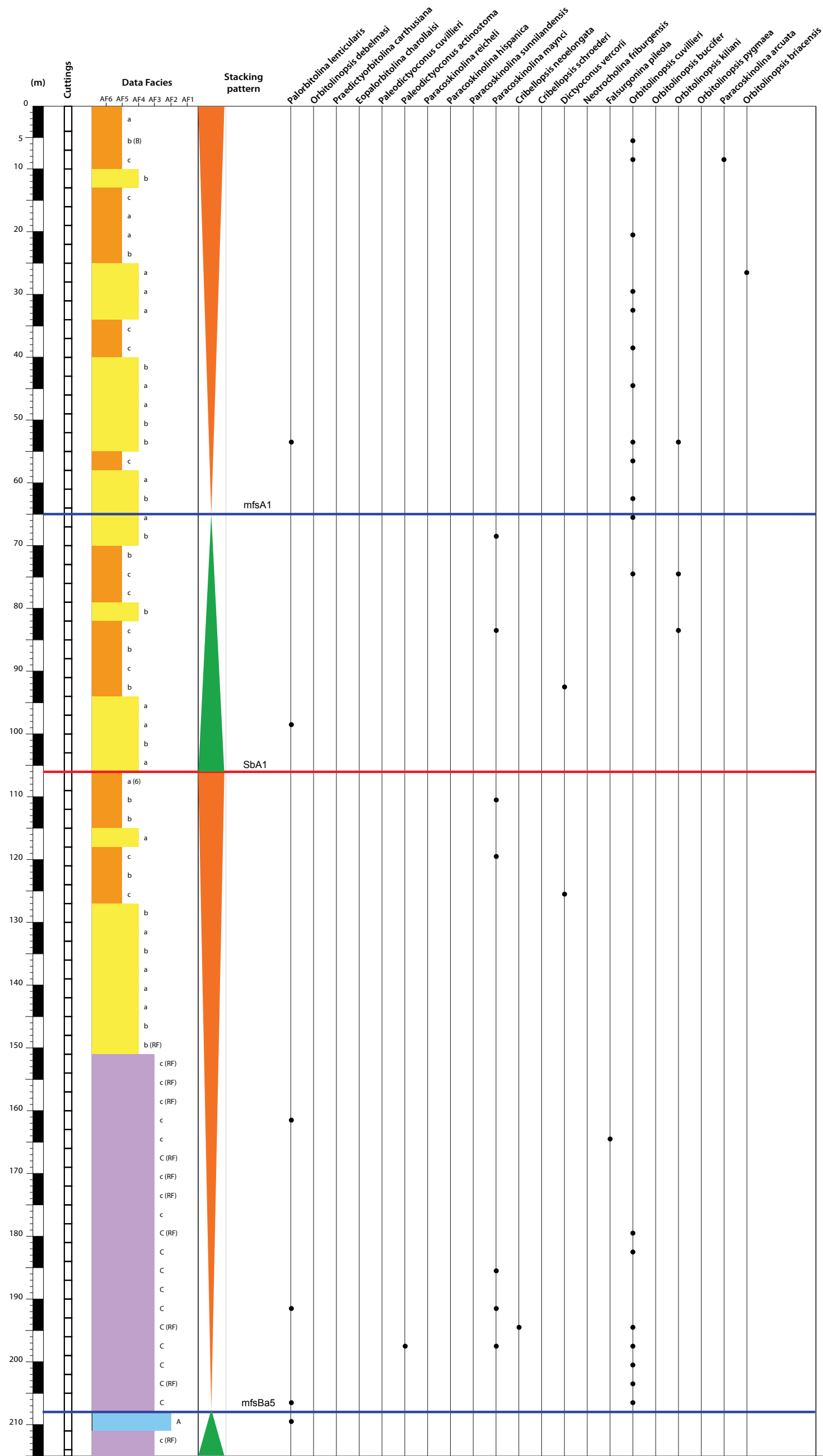
Annexe 22: Log stratigraphique du puits de Saint-Anastase (Gard).



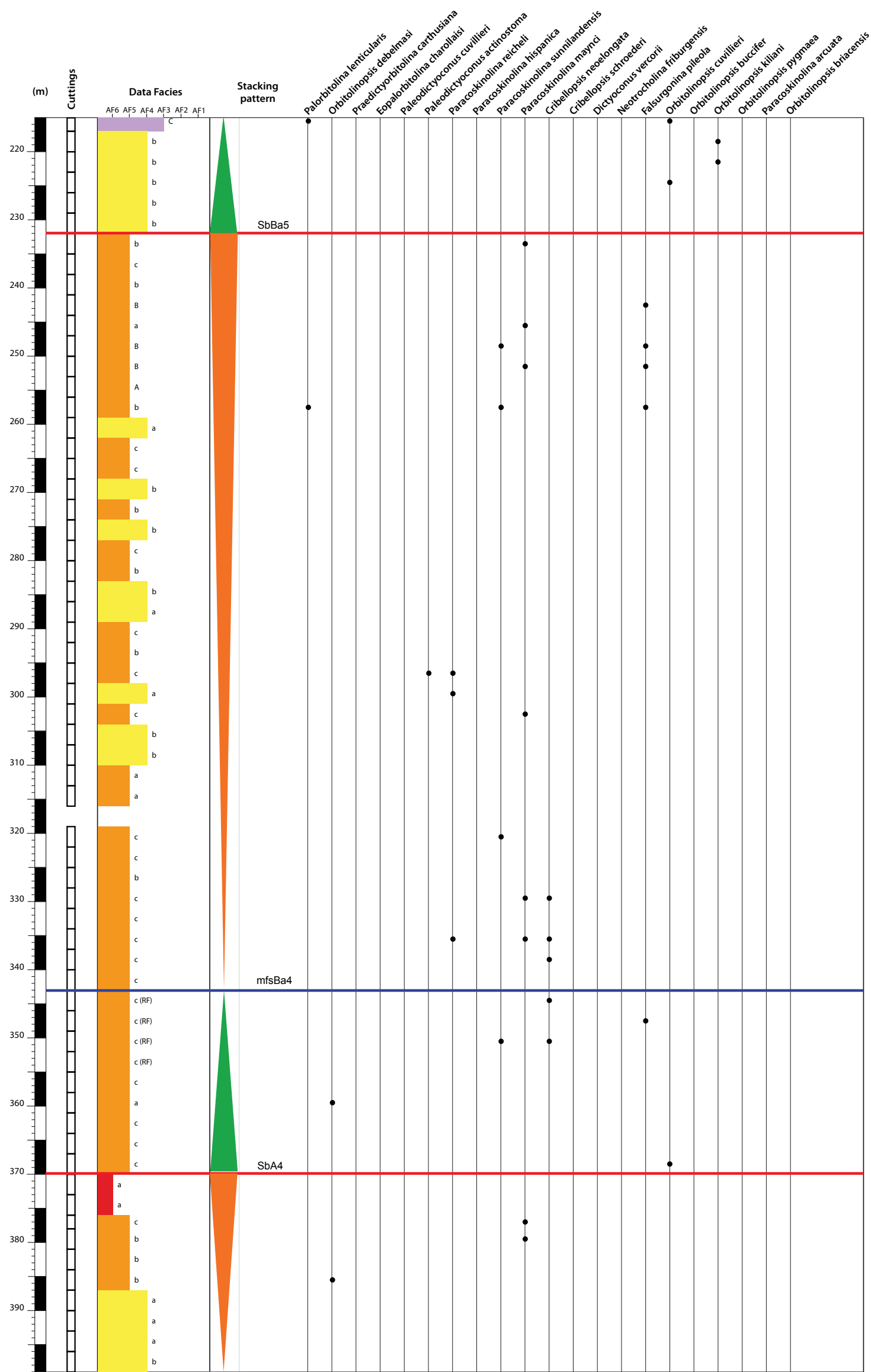




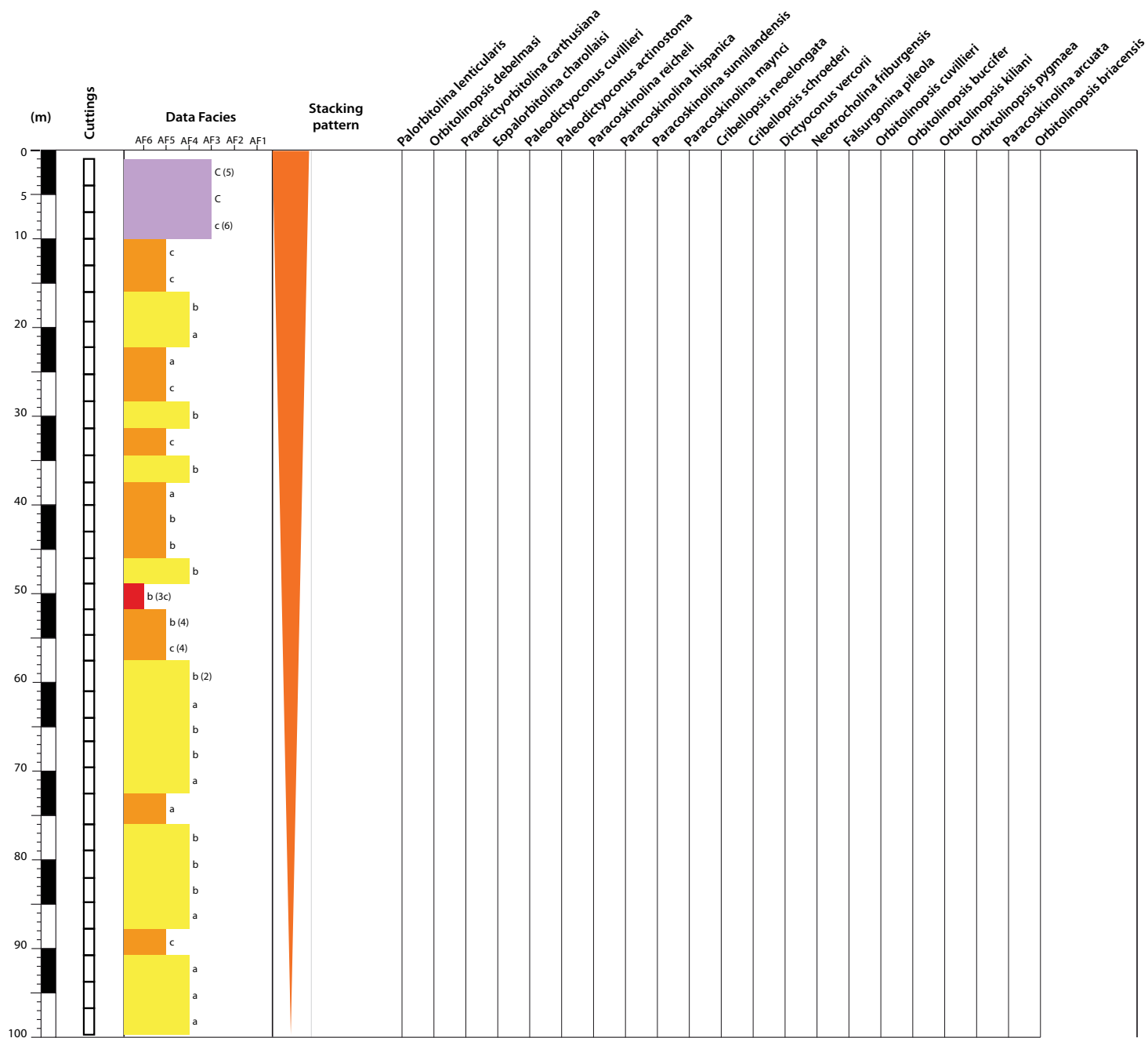
Annexe 23: Log stratigraphique du puits de Sagries (Gard).

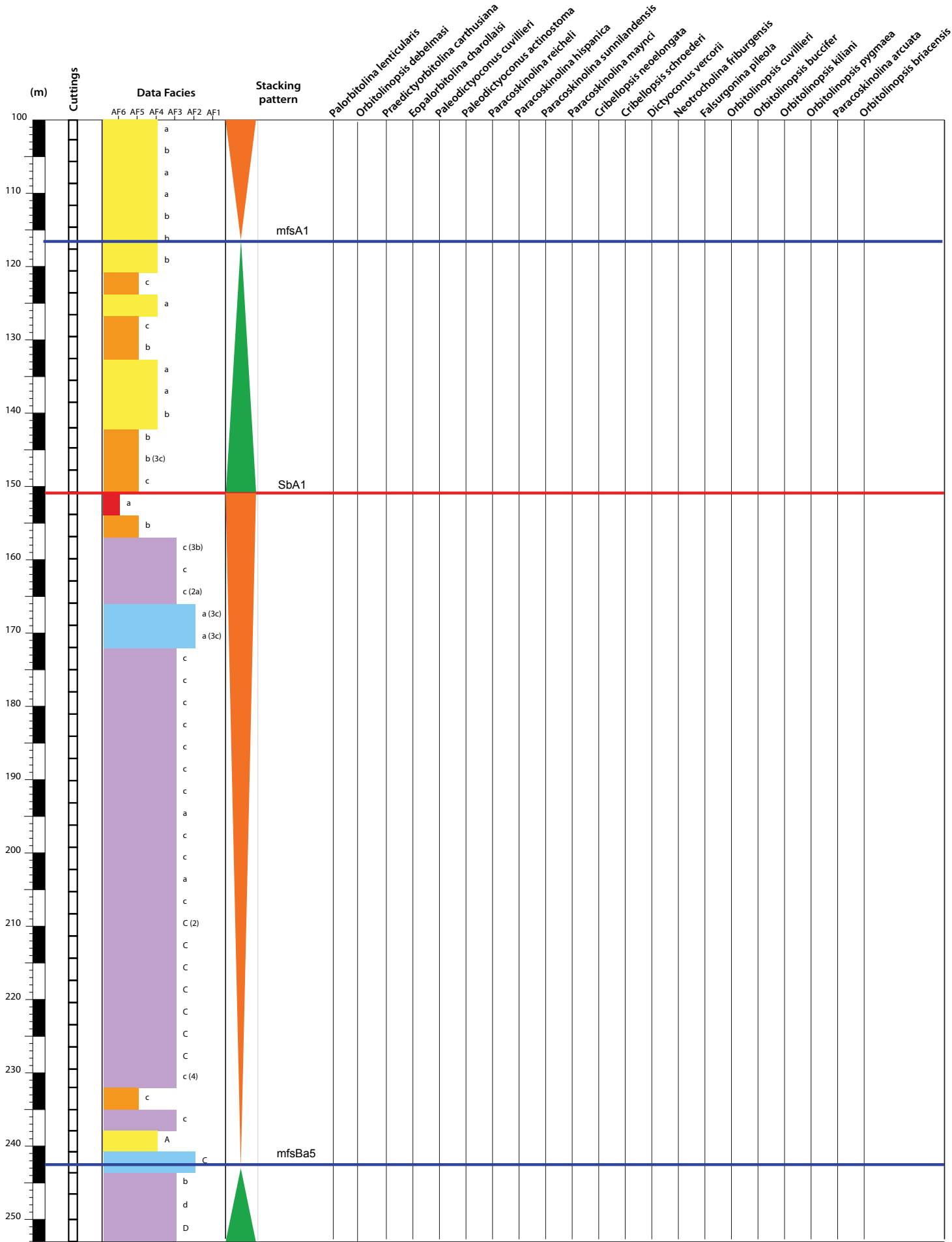


Annexe 24: Sommet du log stratigraphique du puits de Serviers (Gard).

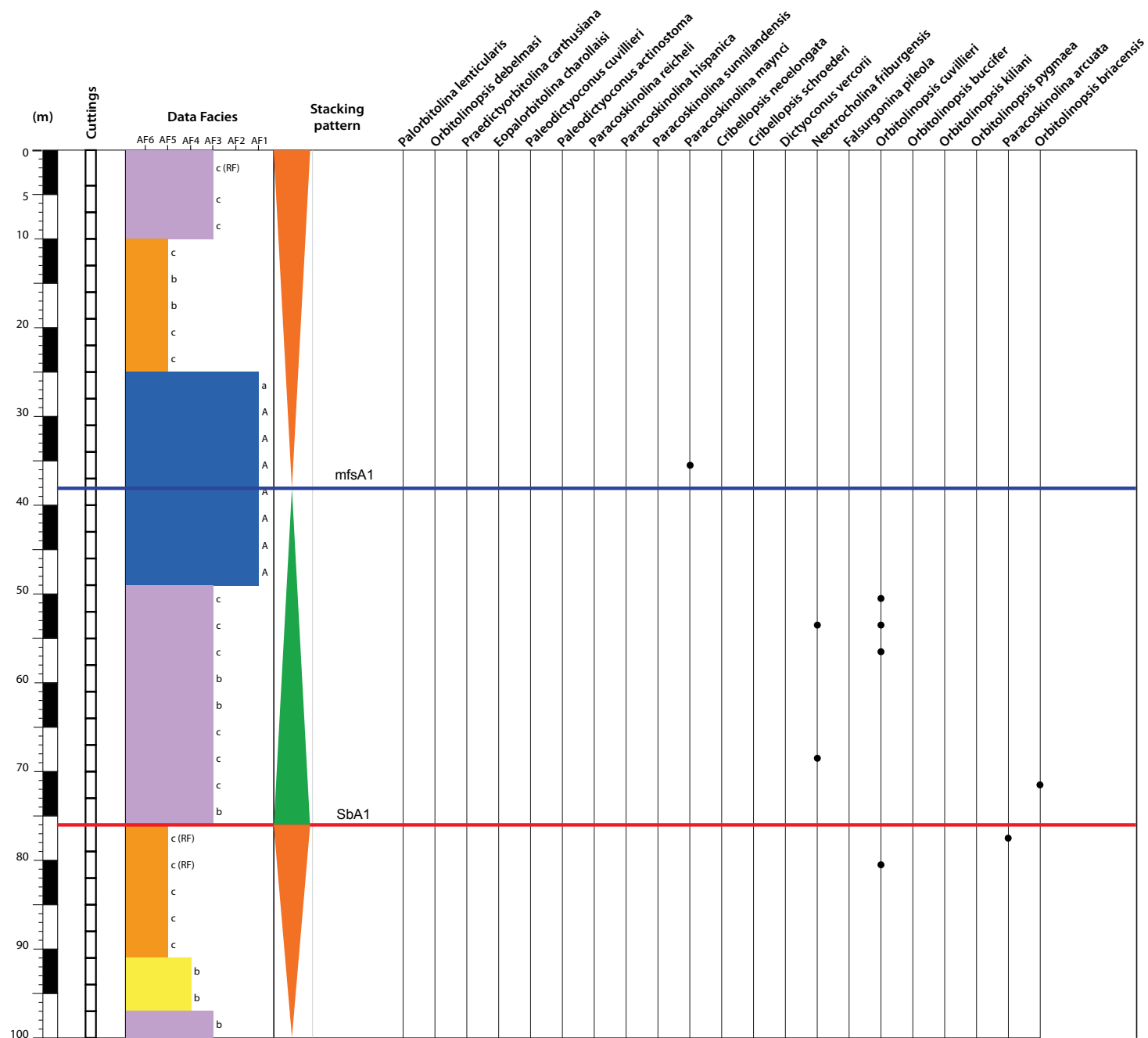


Annexe 25: base du log stratigraphique du puits de Serviers (Gard).



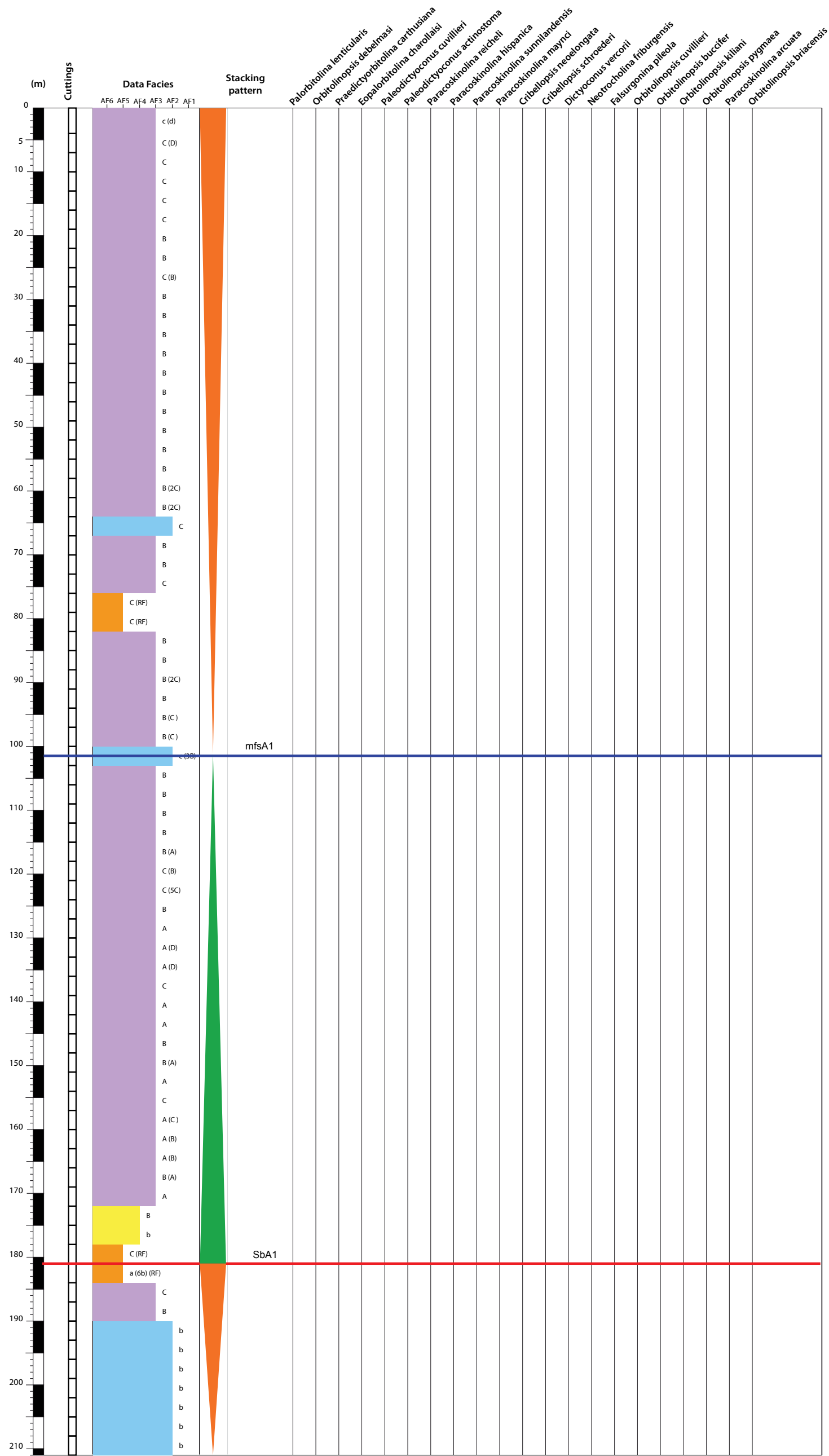


Annexe 26: Log stratigraphique du puits d’Uzes (Gard).

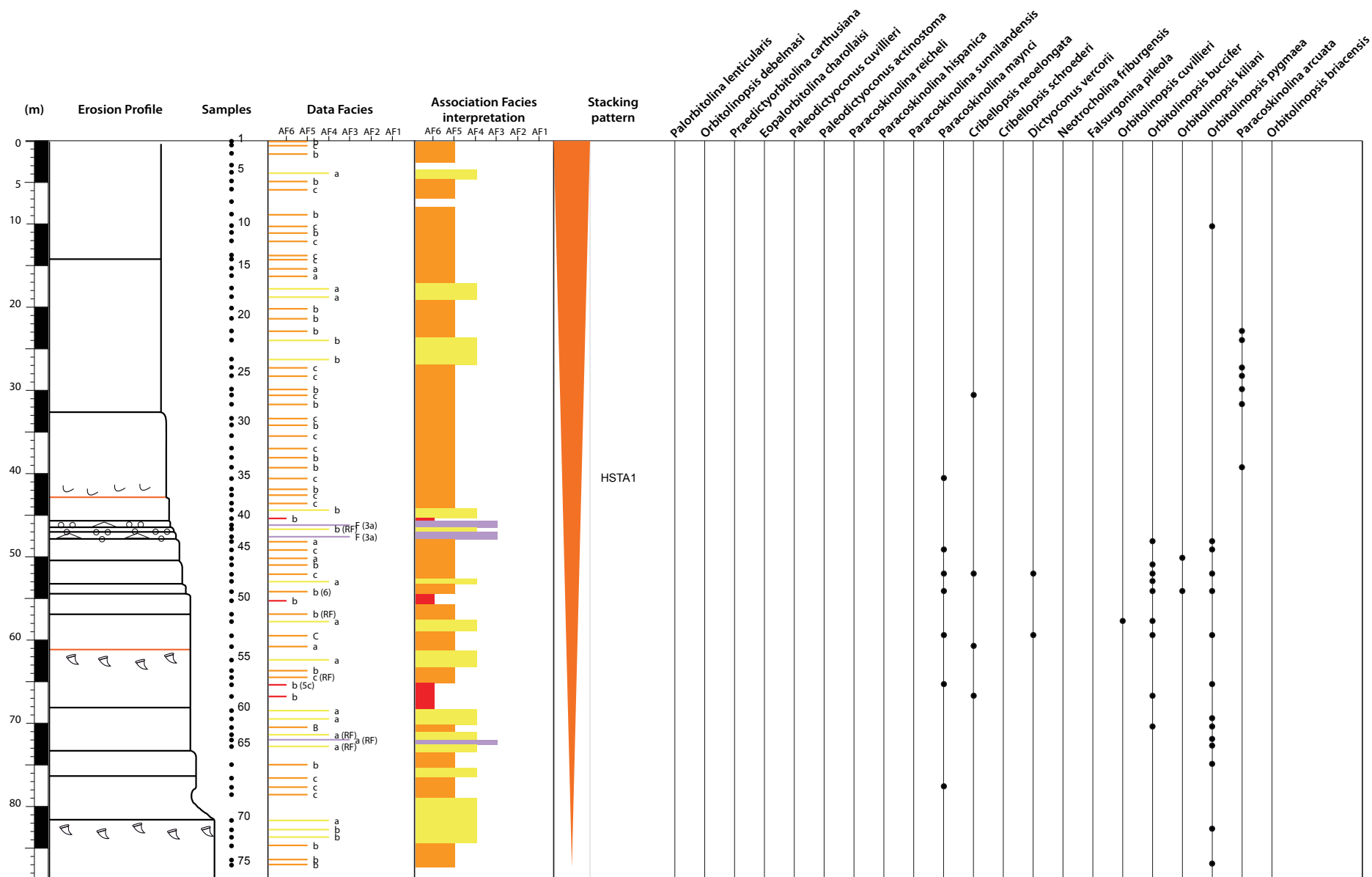




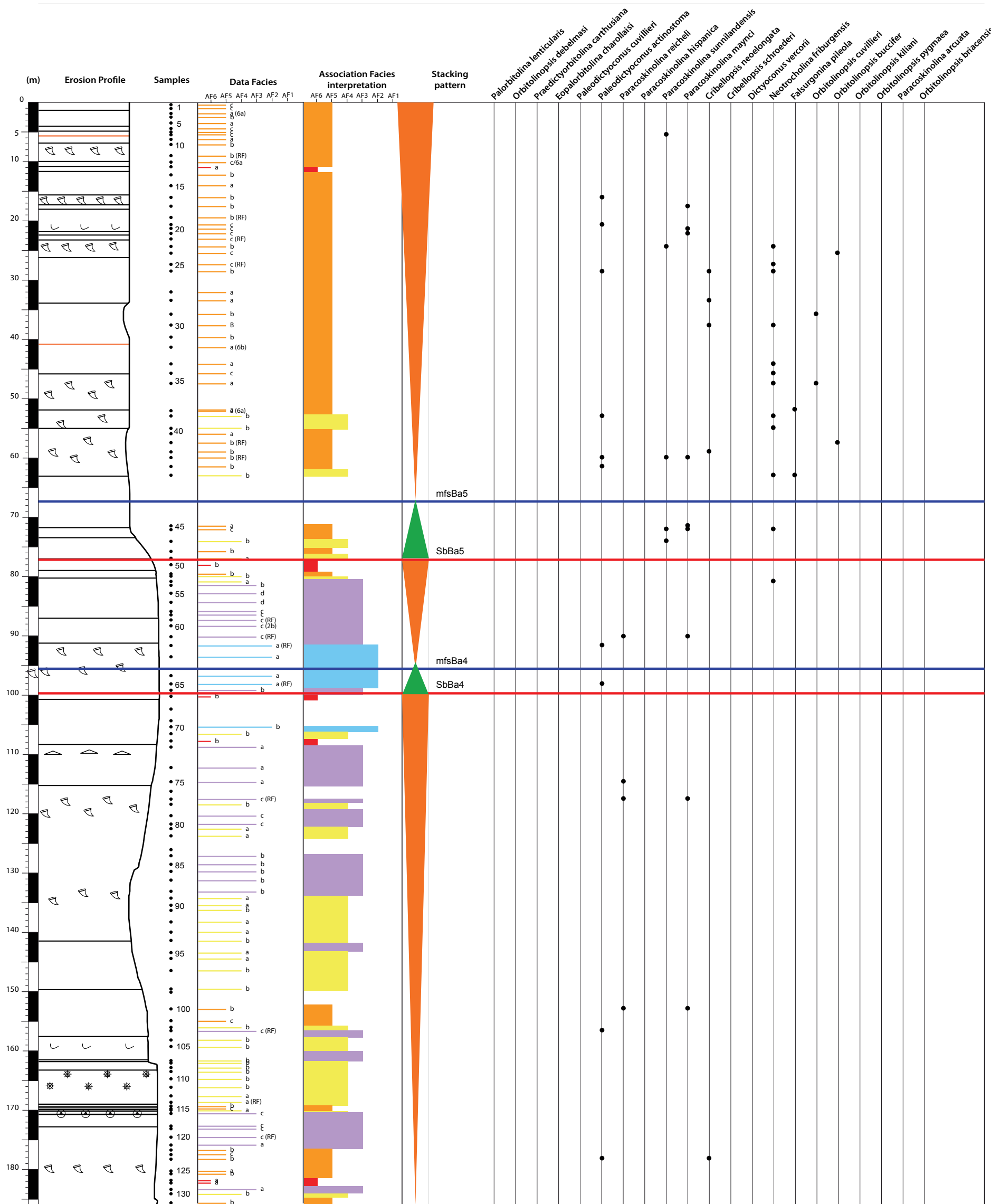




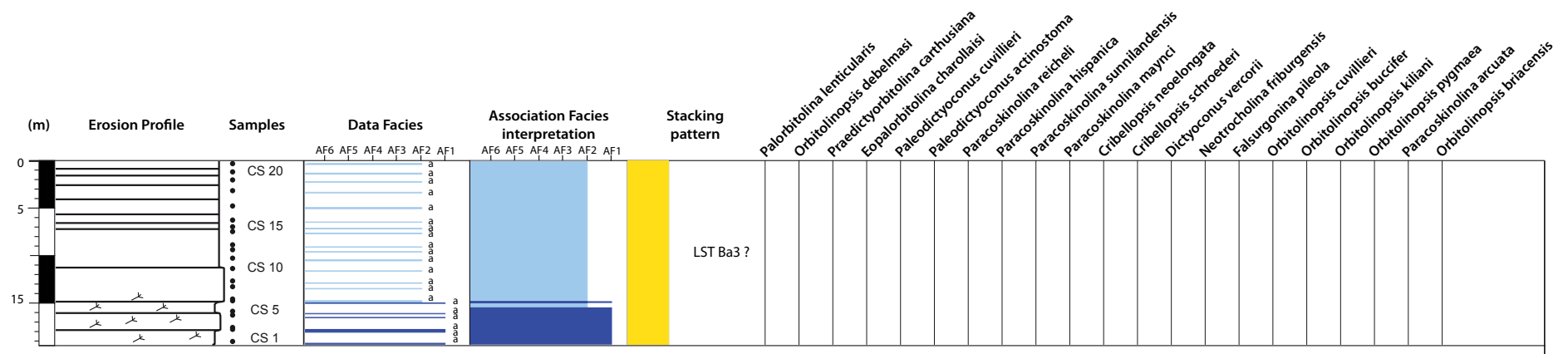
Annexe 28: Log stratigraphique du puits de Saint-Maximin (Gard).



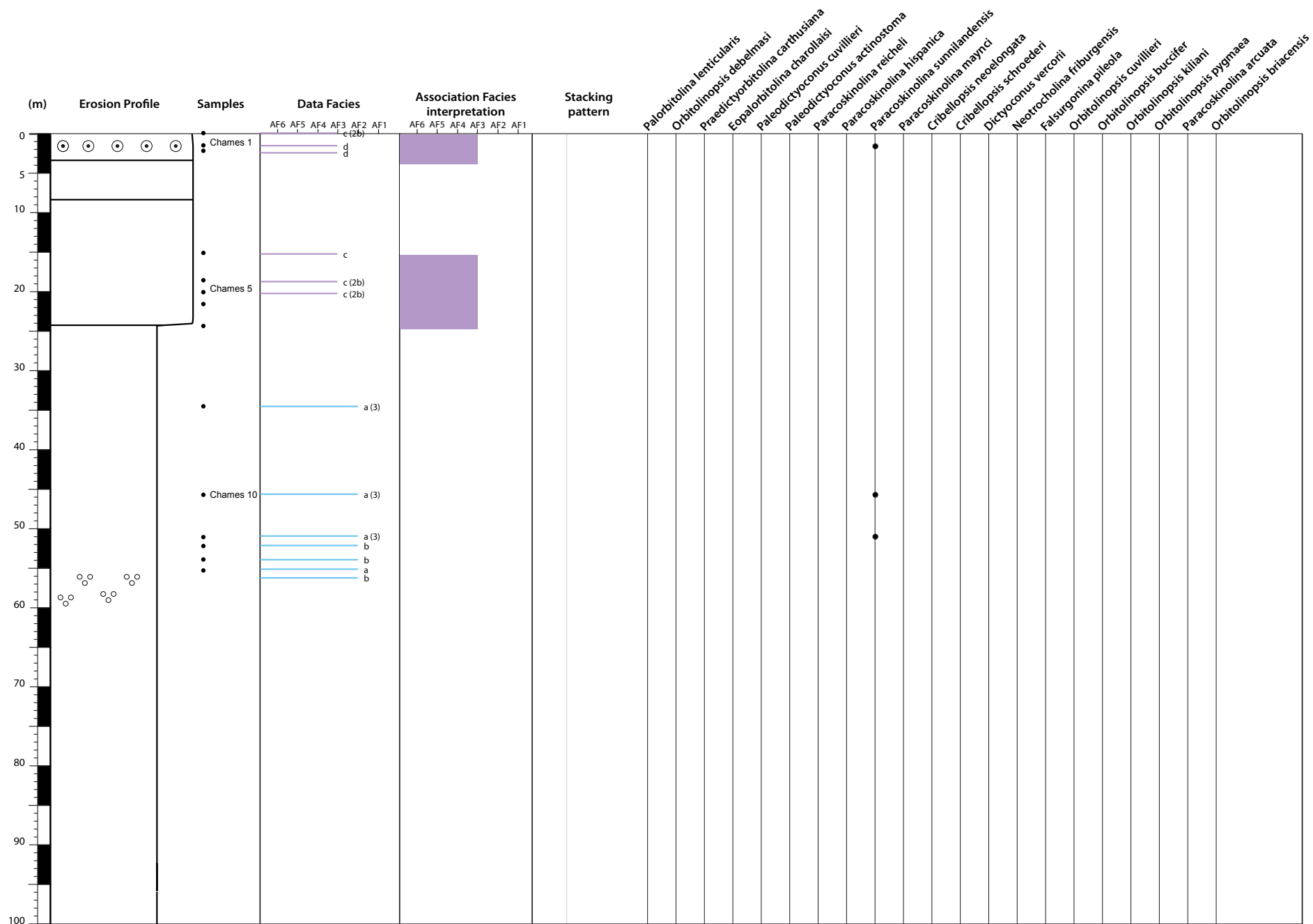
Annexe 29: Log stratigraphique de la coupe d'Aiguèze (Ardèche).

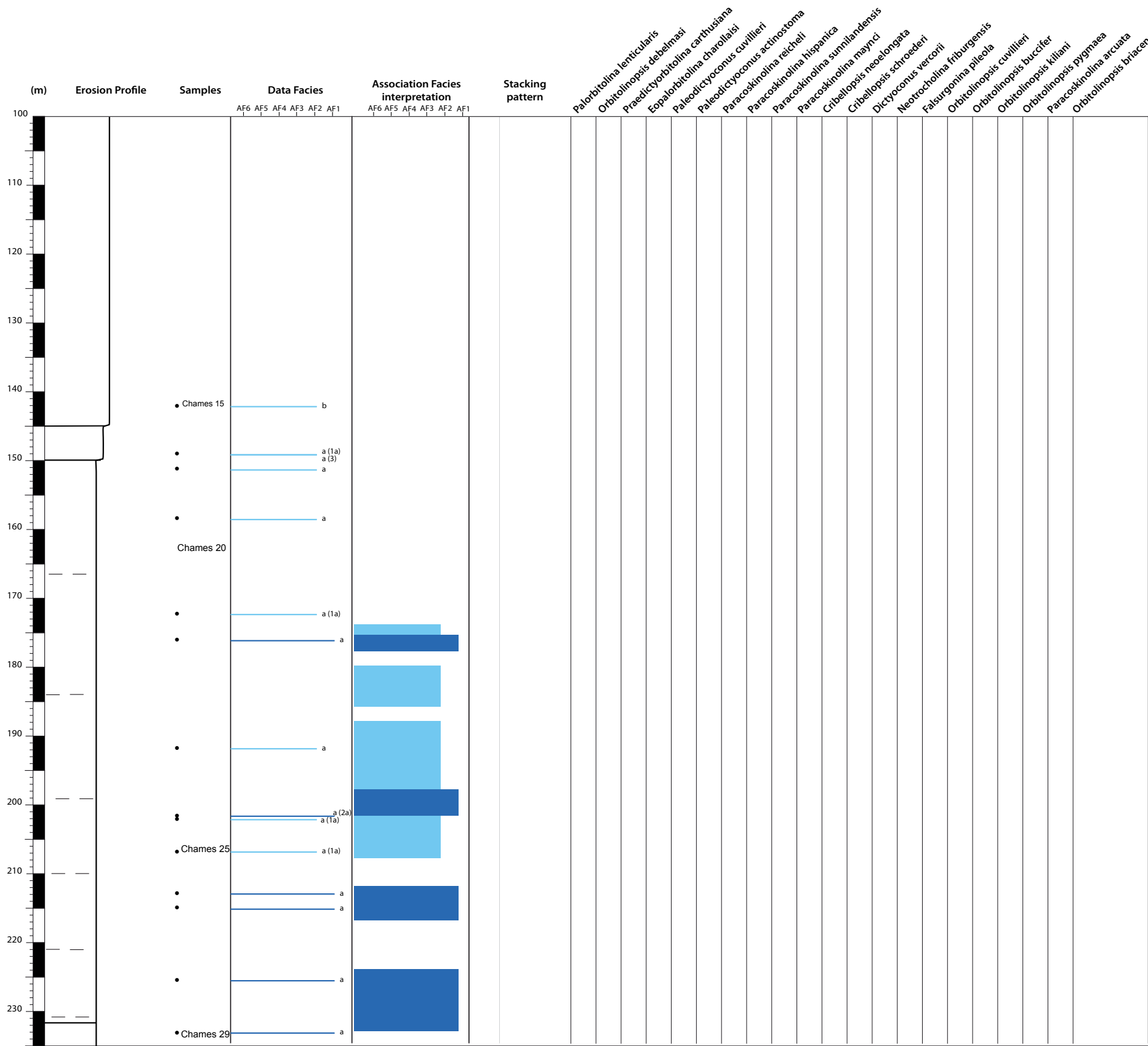


Annexe 30: Log stratigraphique de la coupe d'Autridge (Ardèche).



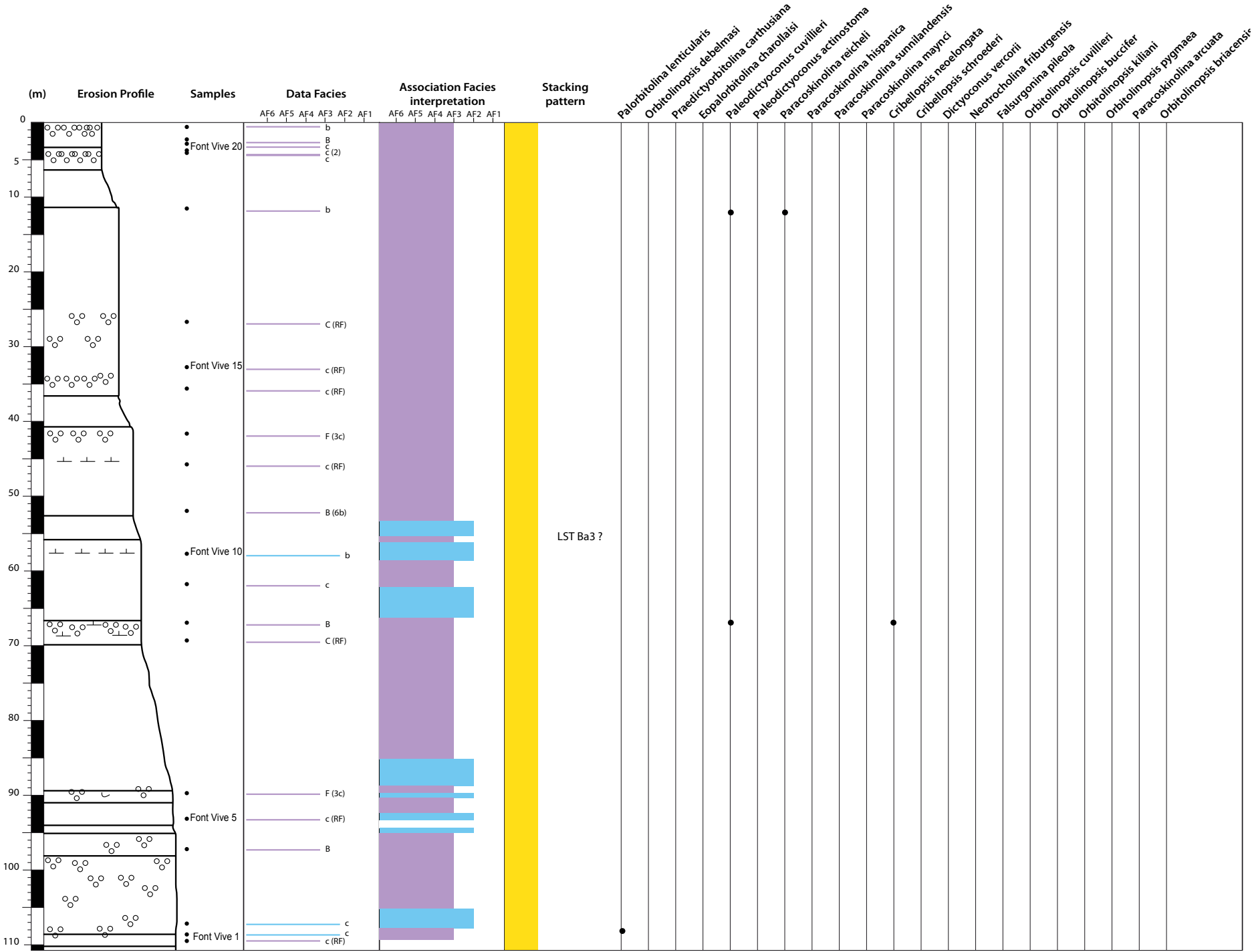
Annexe 31: Log stratigraphique de la coupe du Col de la Serre (Ardèche).



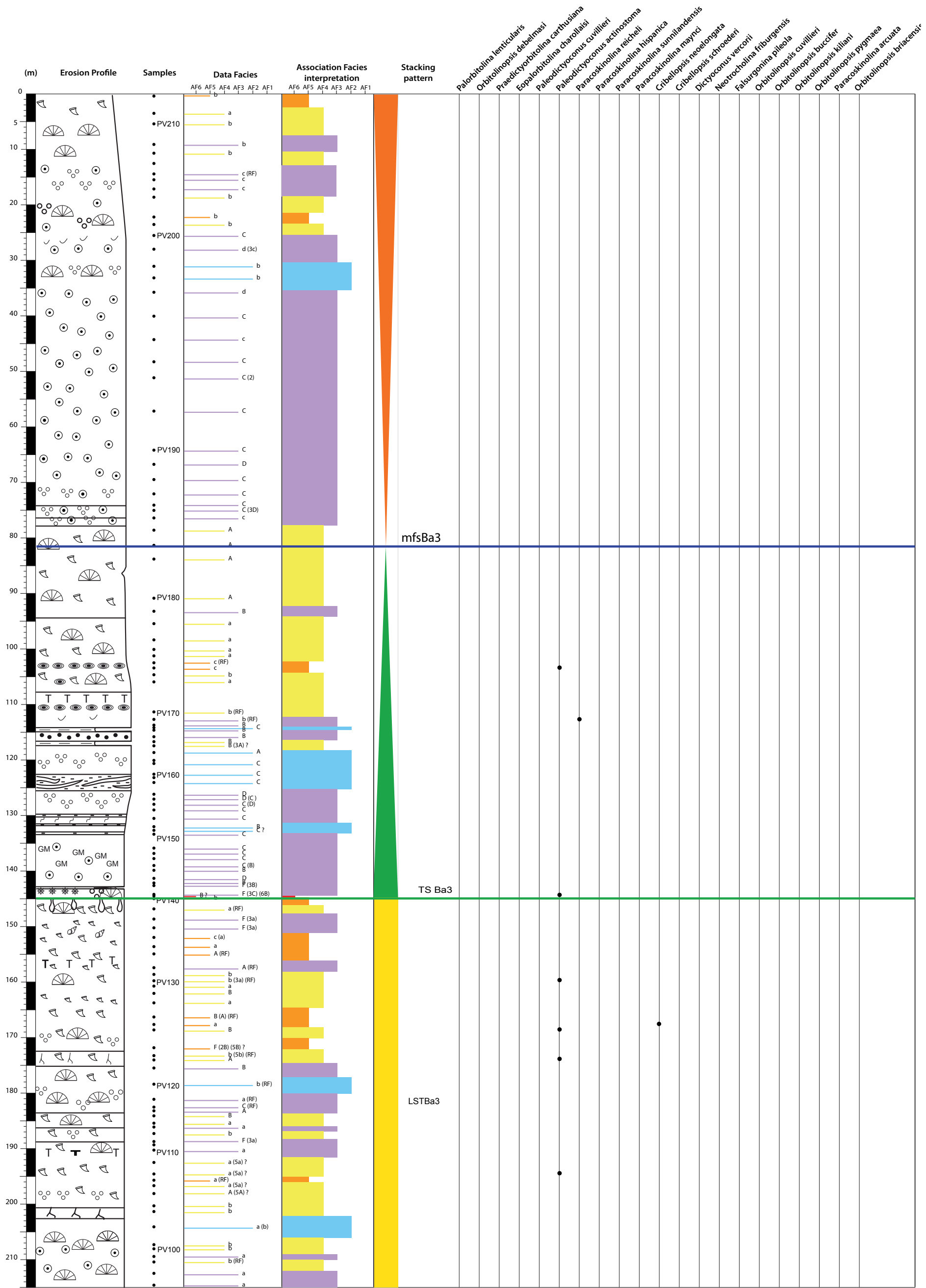


Annexe 32: Log stratigraphique de la coupe de Chames (Ardèche).

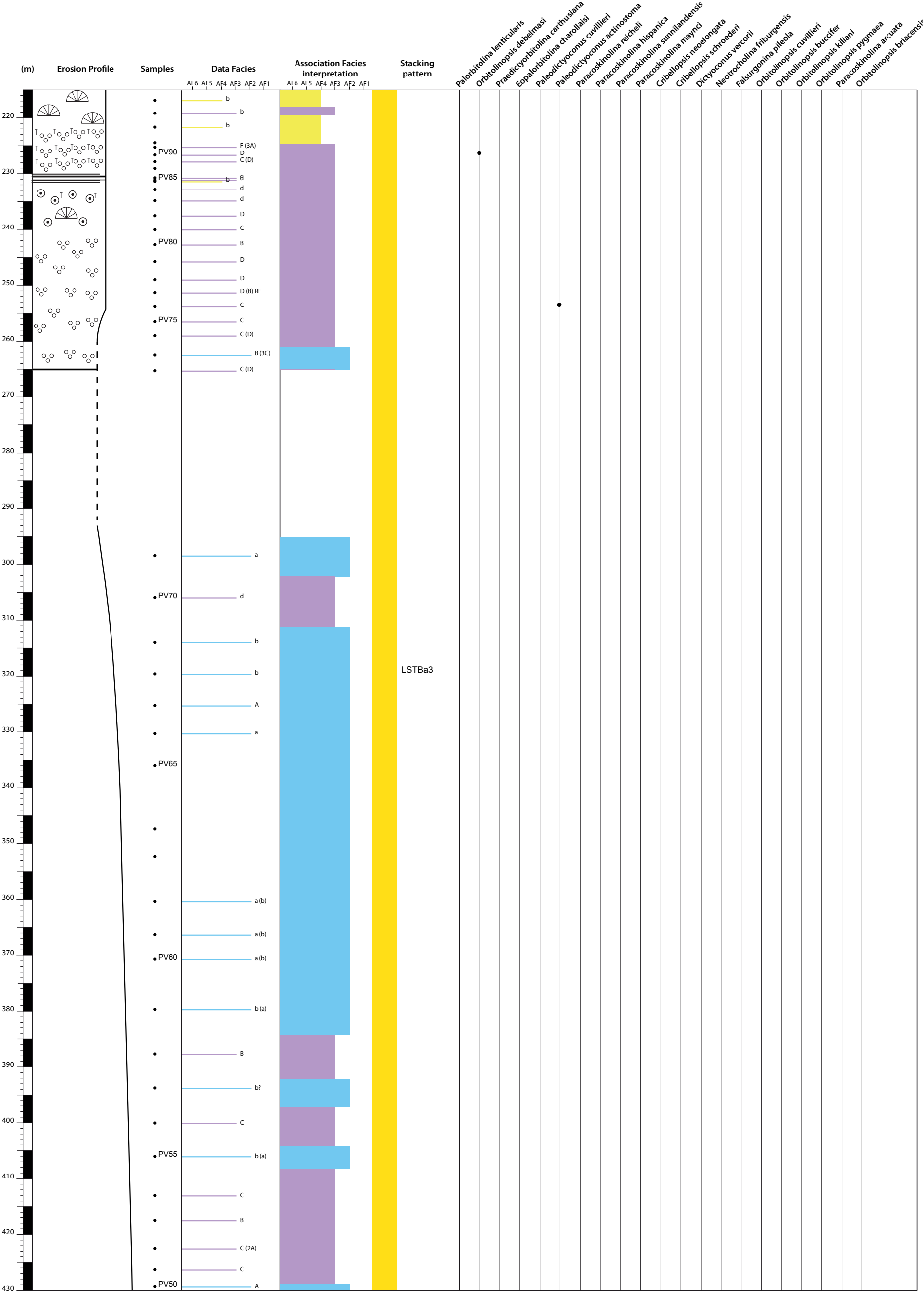




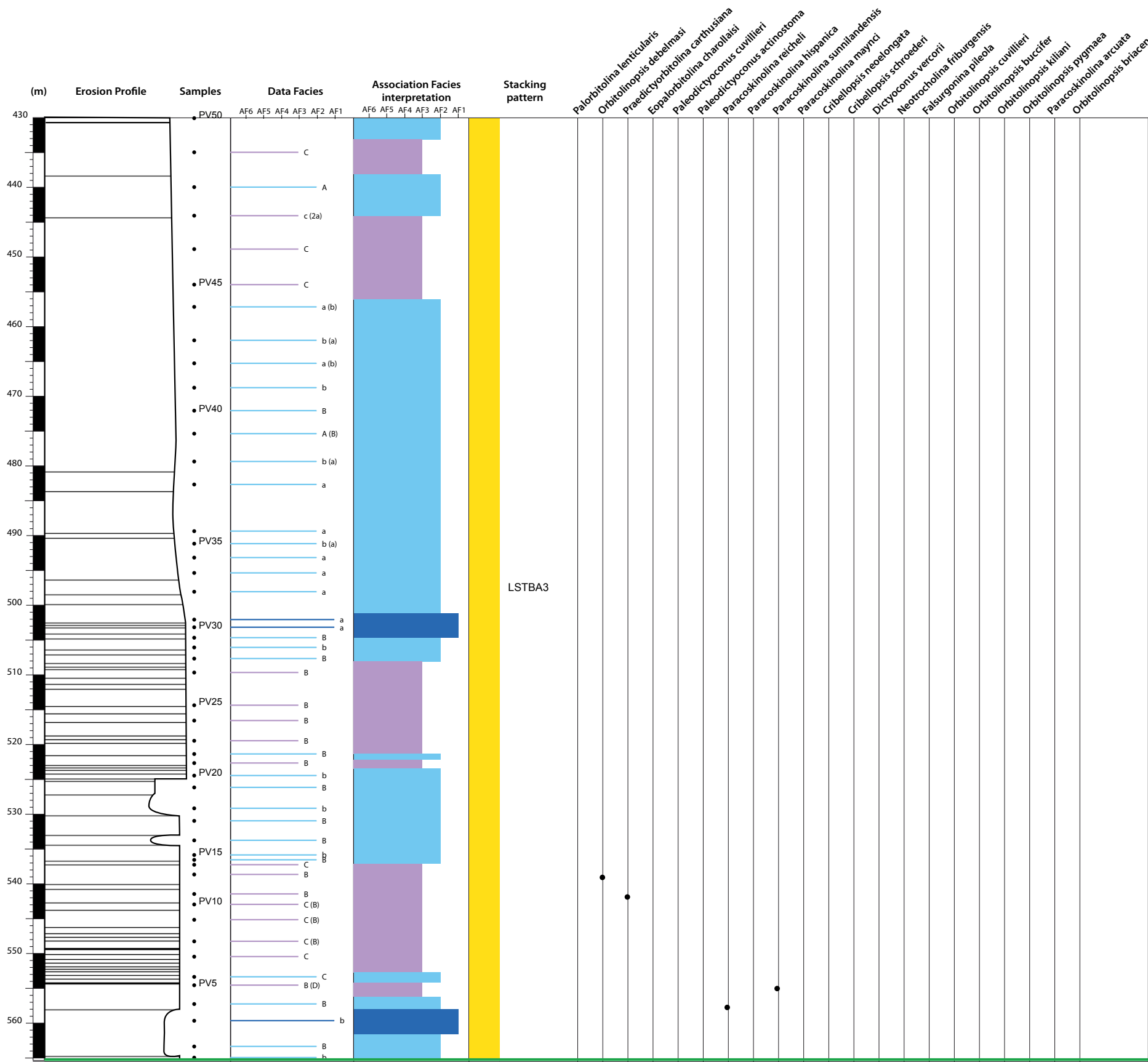
Annexe 33: Log stratigraphique de la coupe de Font Vive (Ardèche).



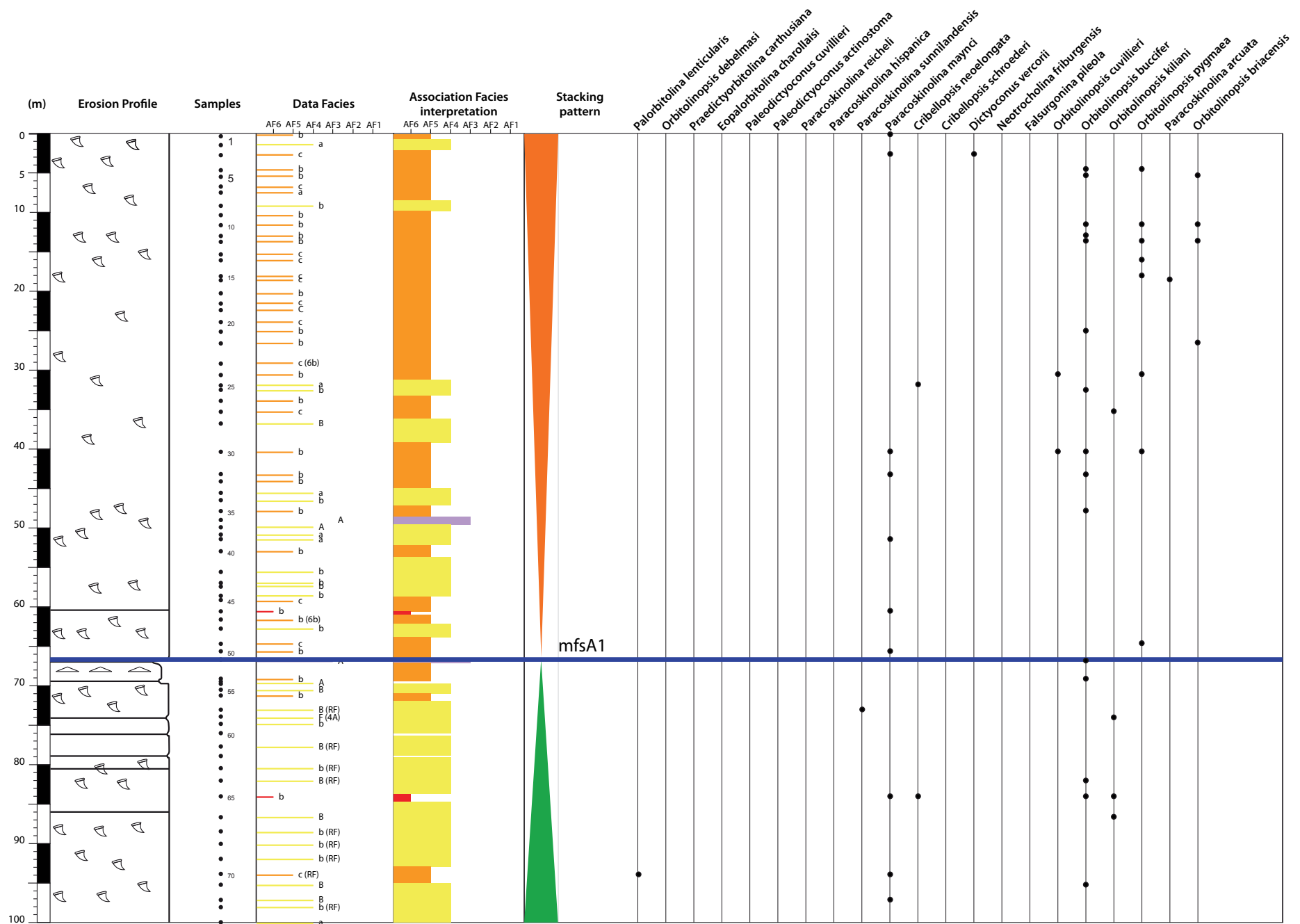
Annexe 34: Sommet du log stratigraphique de la coupe de Pont de Laval (Ardèche).



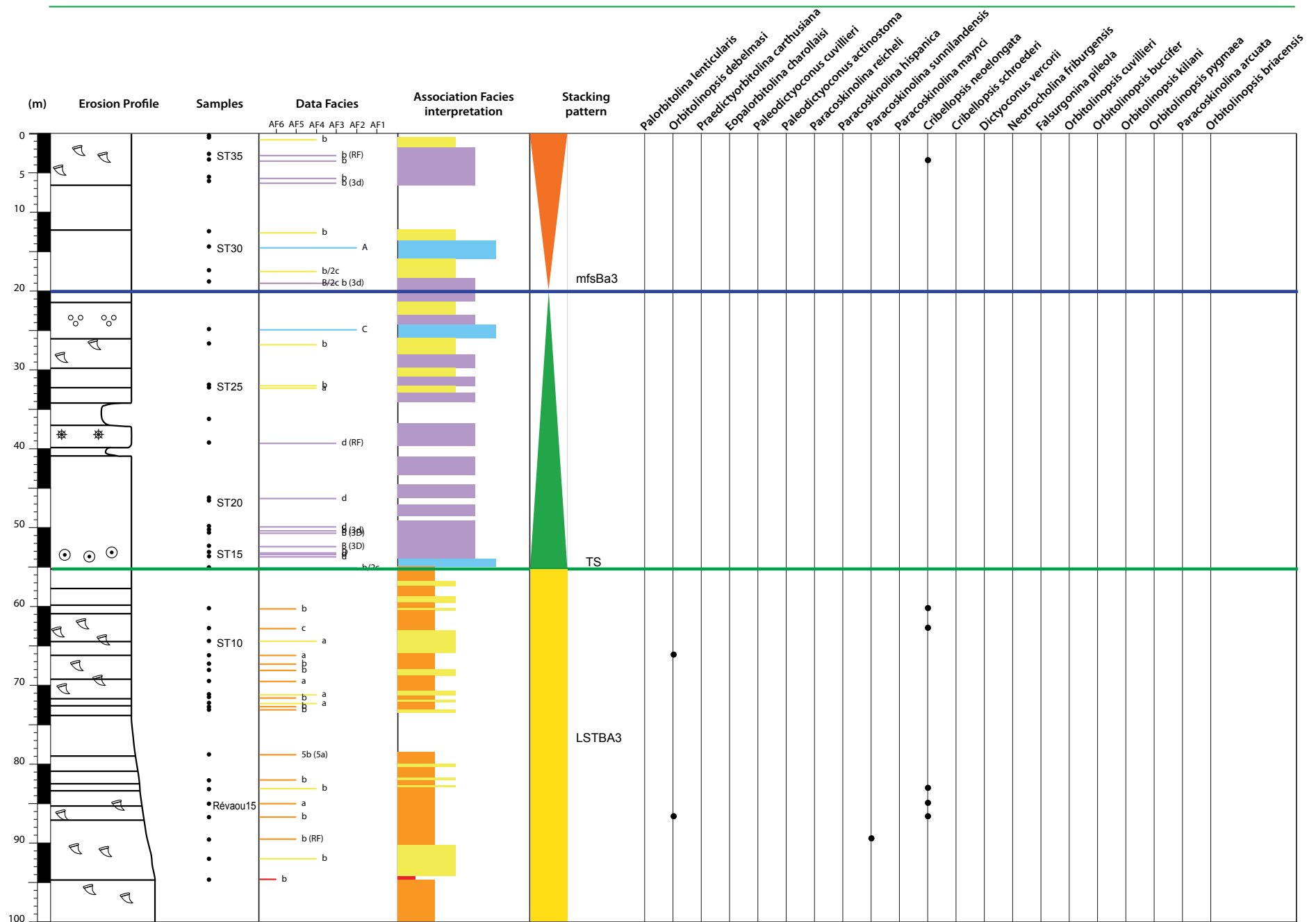
Annexe 35: Partie centrale du log stratigraphique de la coupe de Pont de Laval (Ardèche).



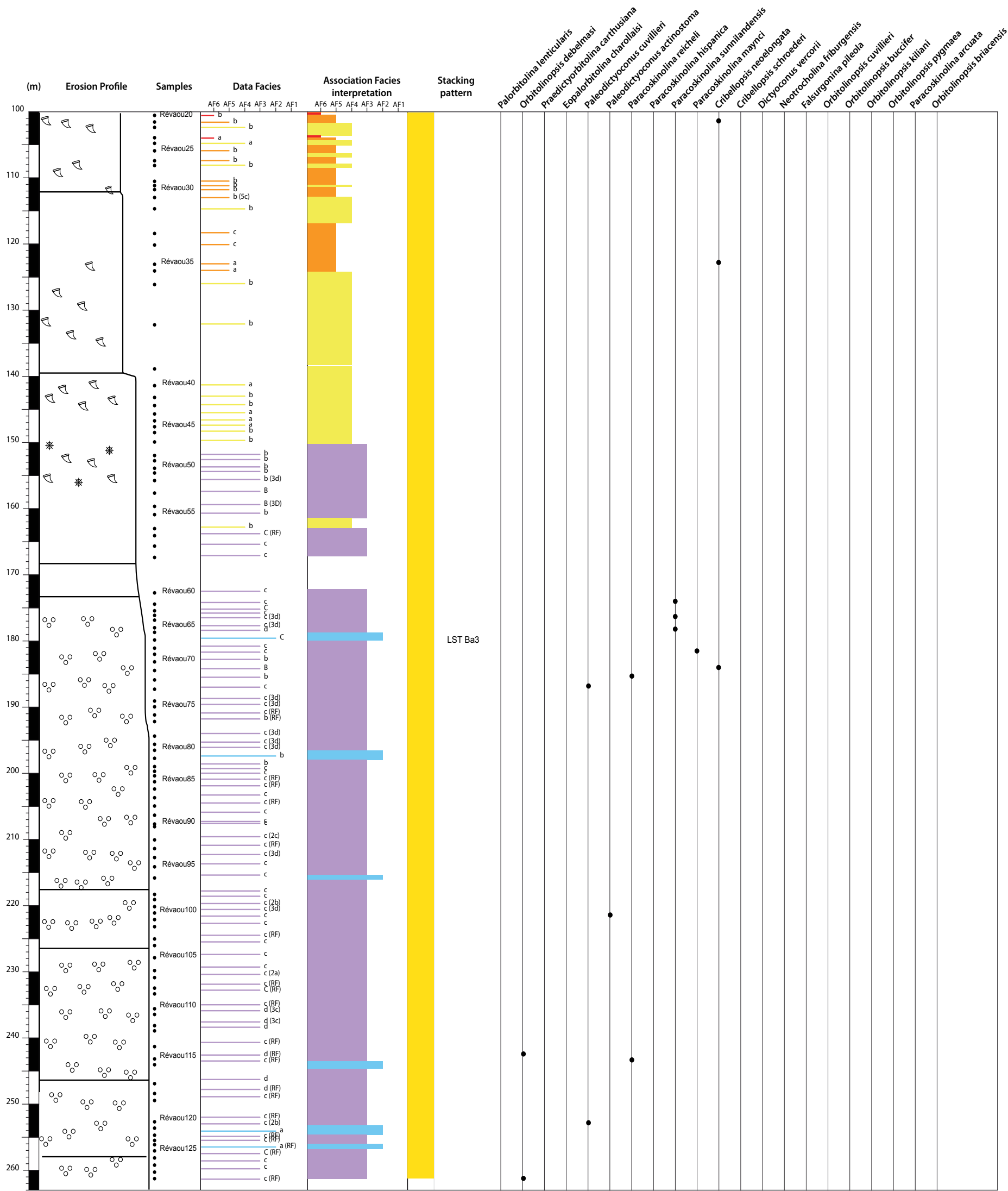
Annexe 36: Base du log stratigraphique de la coupe de Pont de Laval (Ardèche).



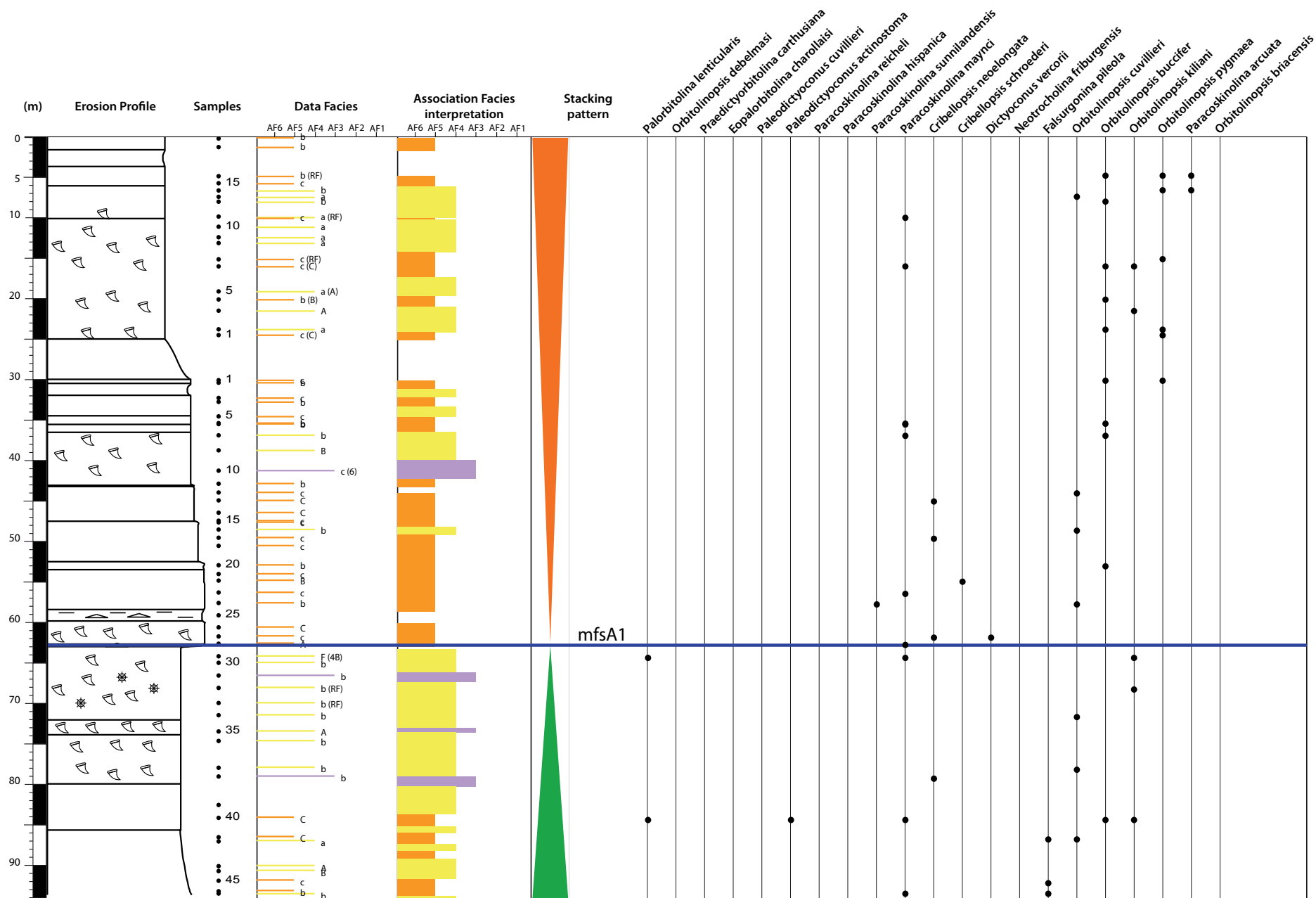




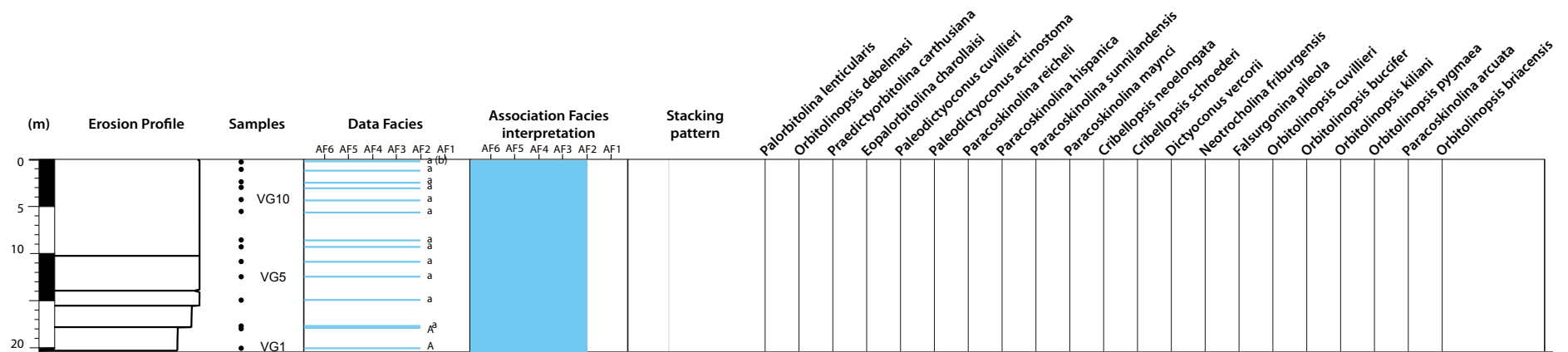




Annexe 38: Log stratigraphique de la coupe de Serrou (Ardèche).

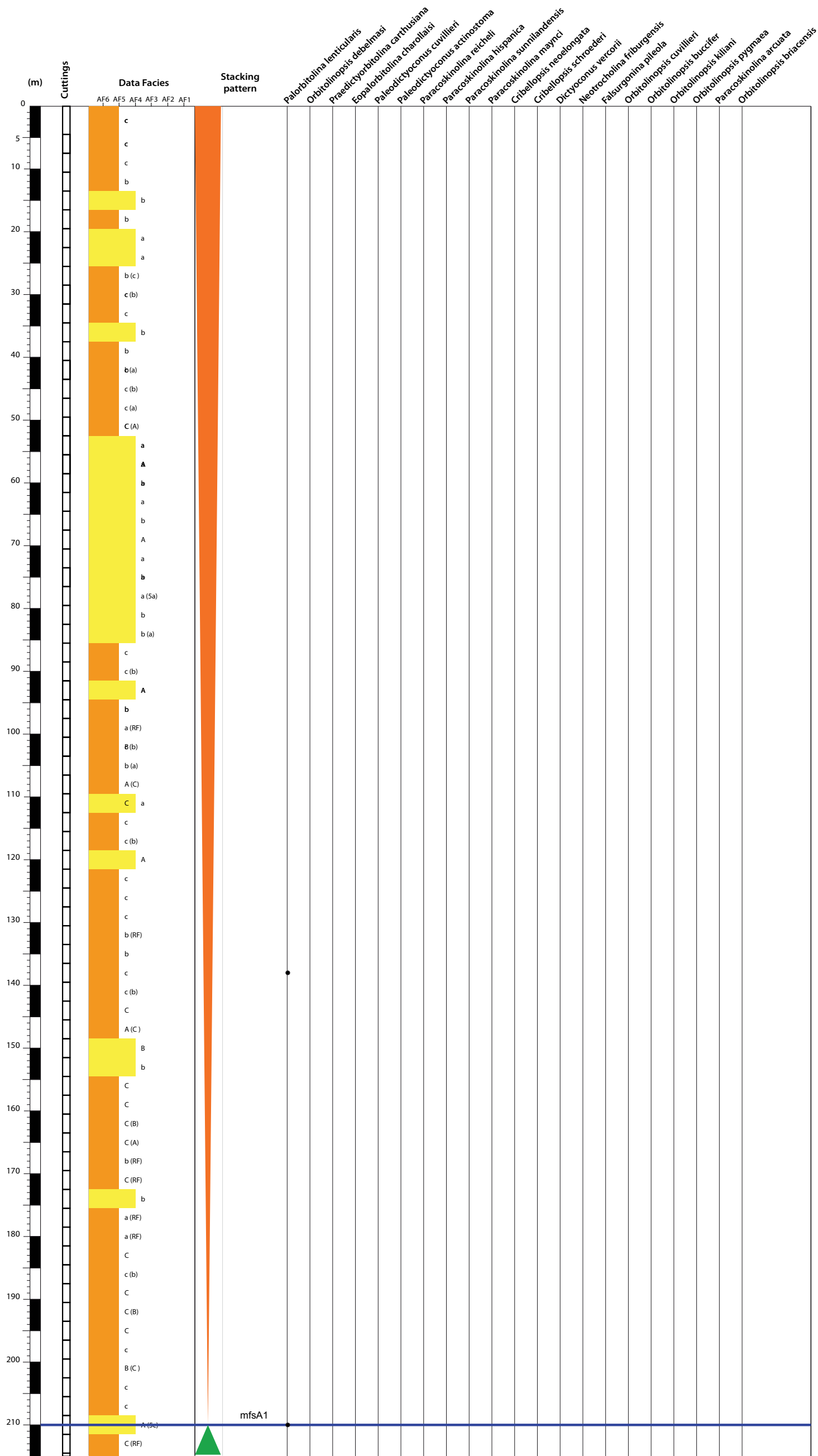


Annexe 39: Log stratigraphique de la coupe de Saint-Marcel (Ardèche).

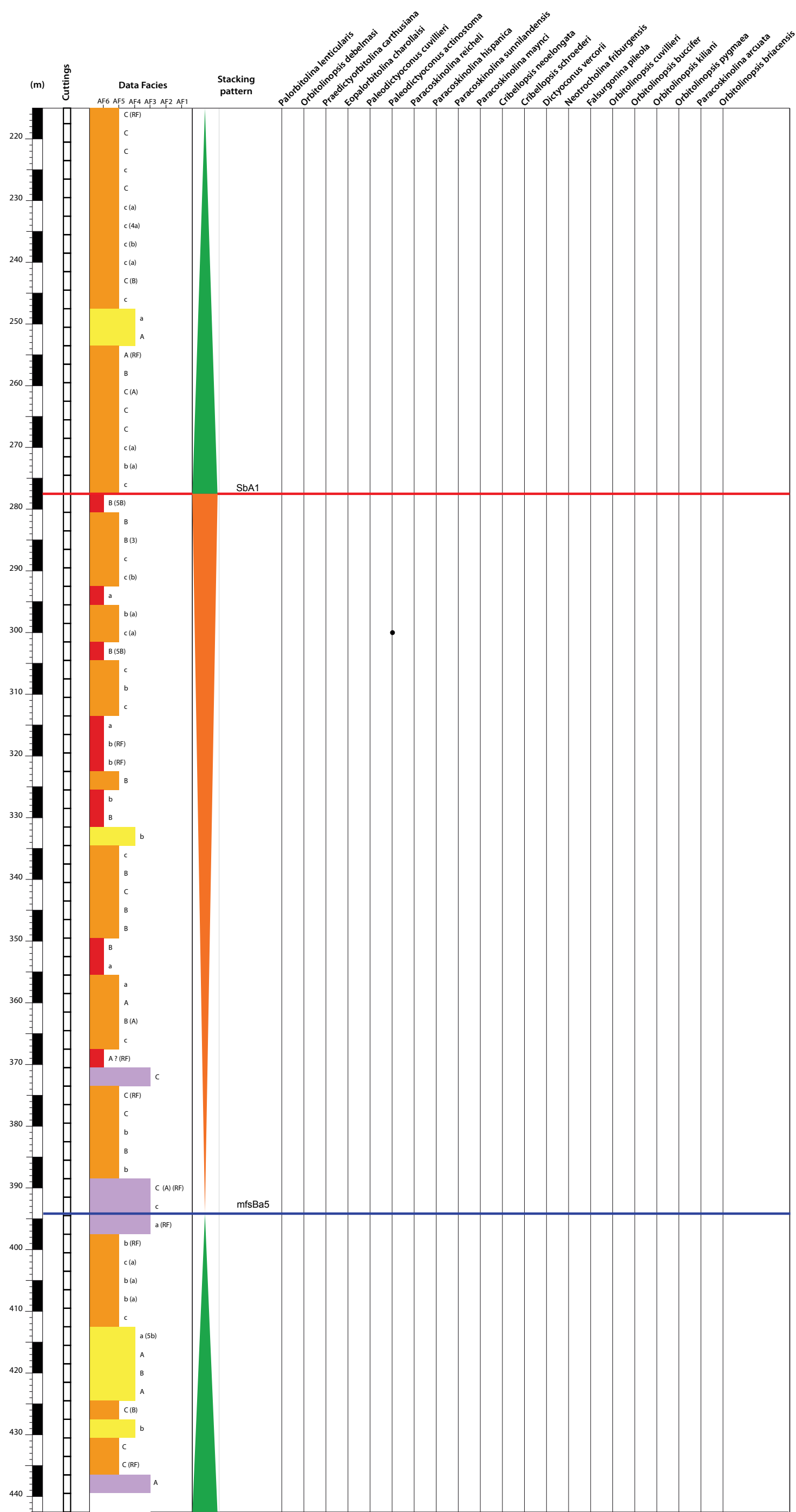


Annexe 40: Log stratigraphique de la coupe de Viviers gare (Ardèche).





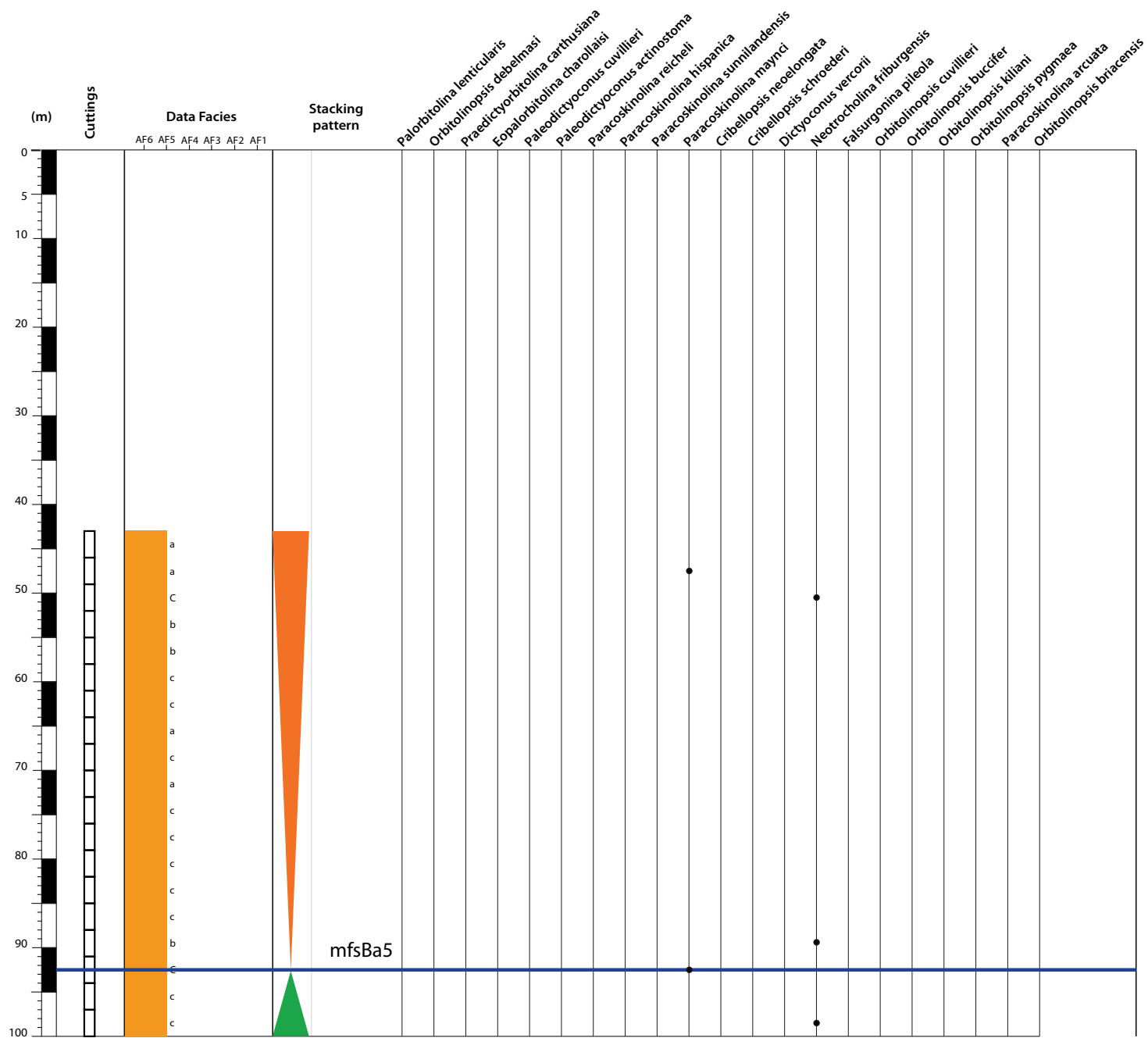
Annexe 42: Sommet du log stratigraphique du Puits du Garn (Ardèche).

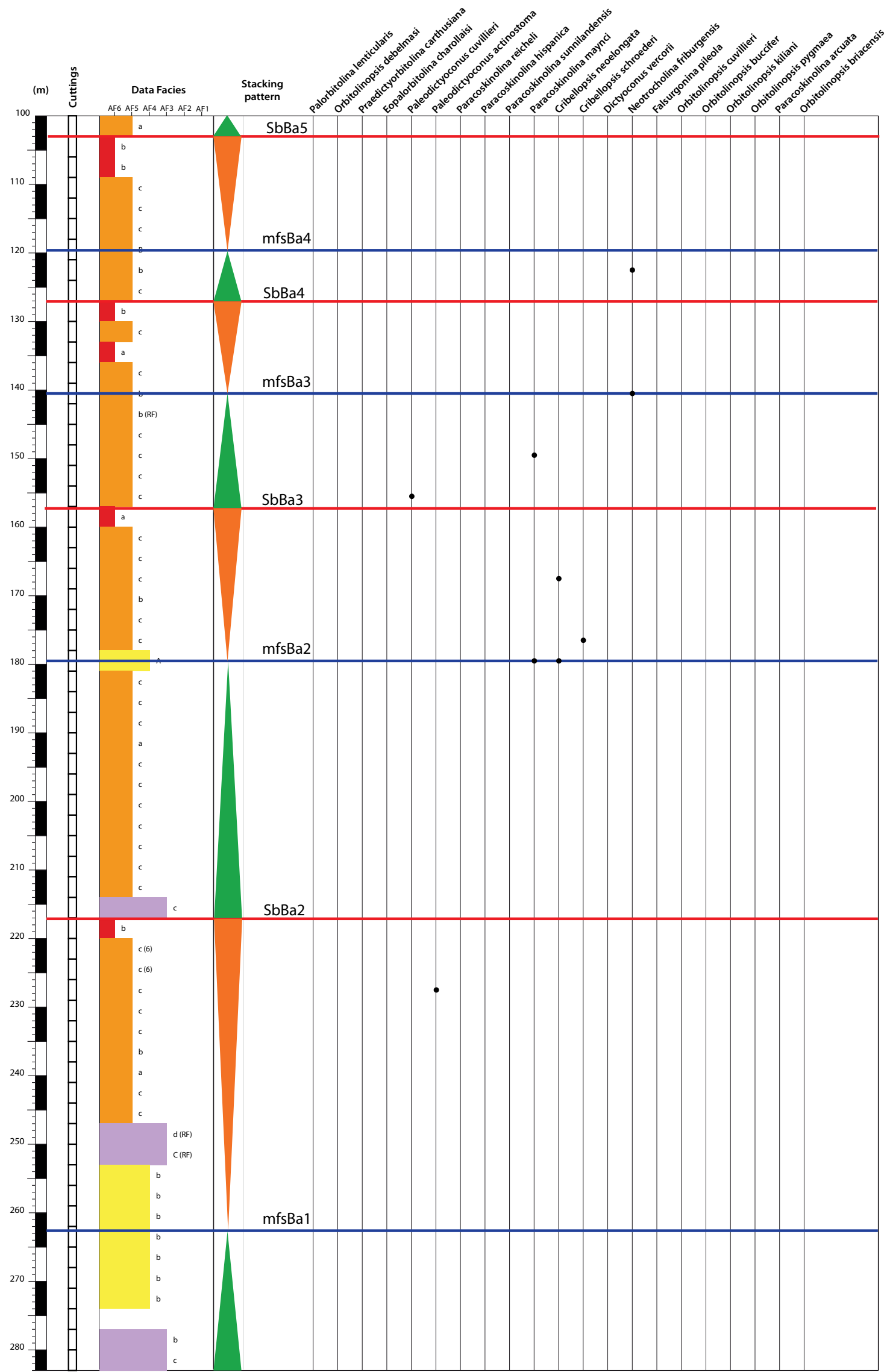


Annexe 43: Base du log stratigraphique du Puits du Garn (Ardèche).

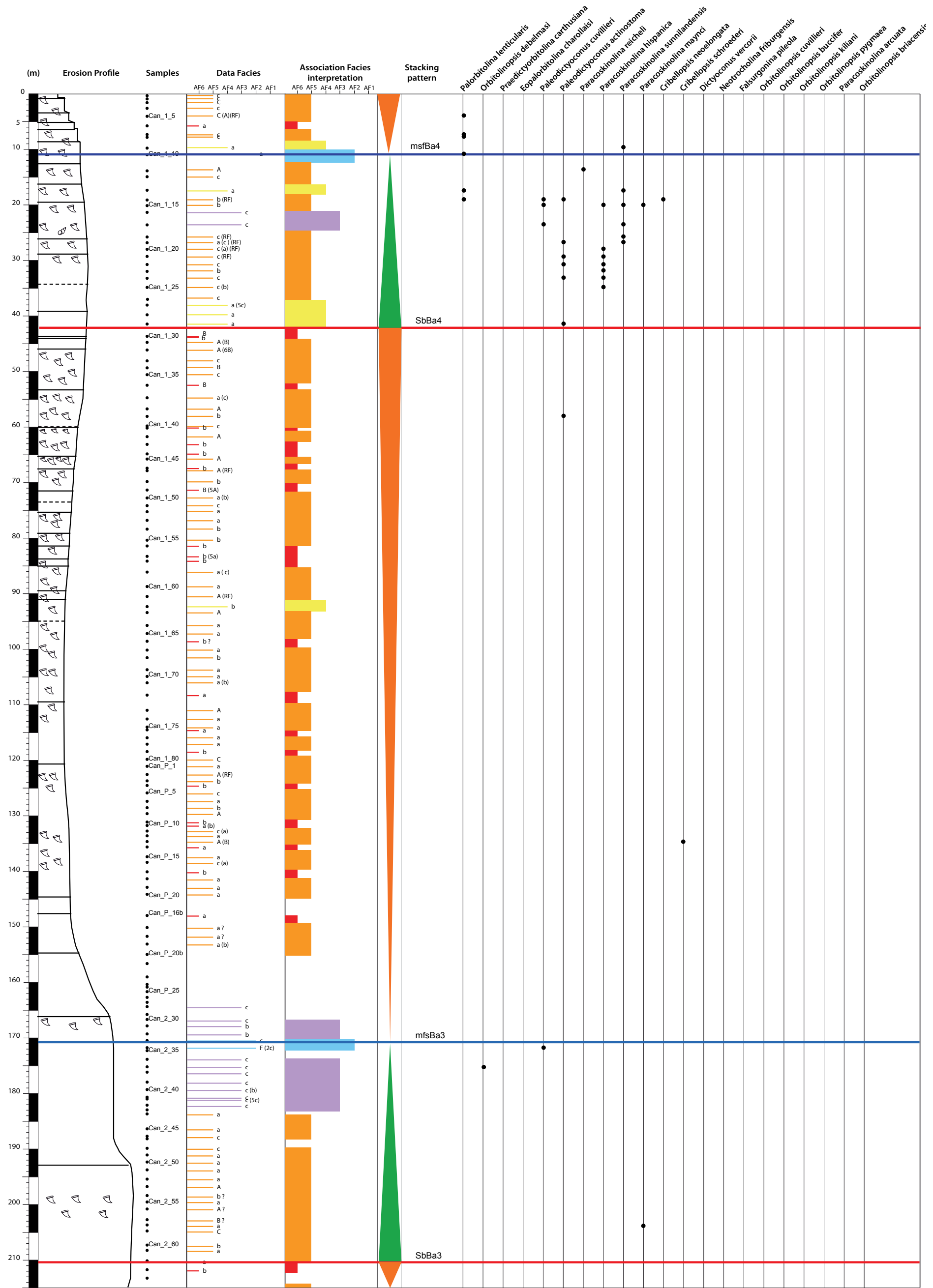




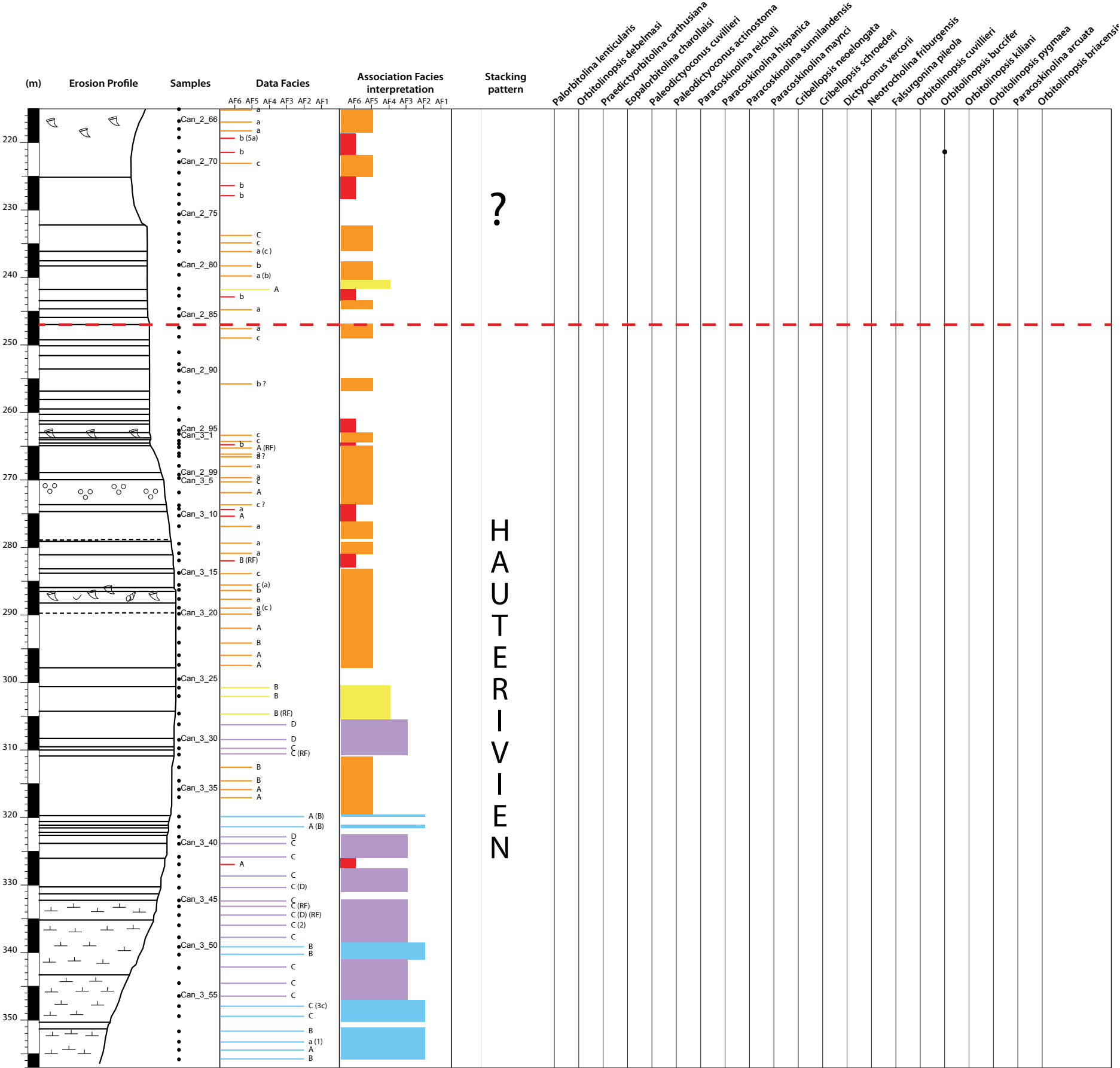




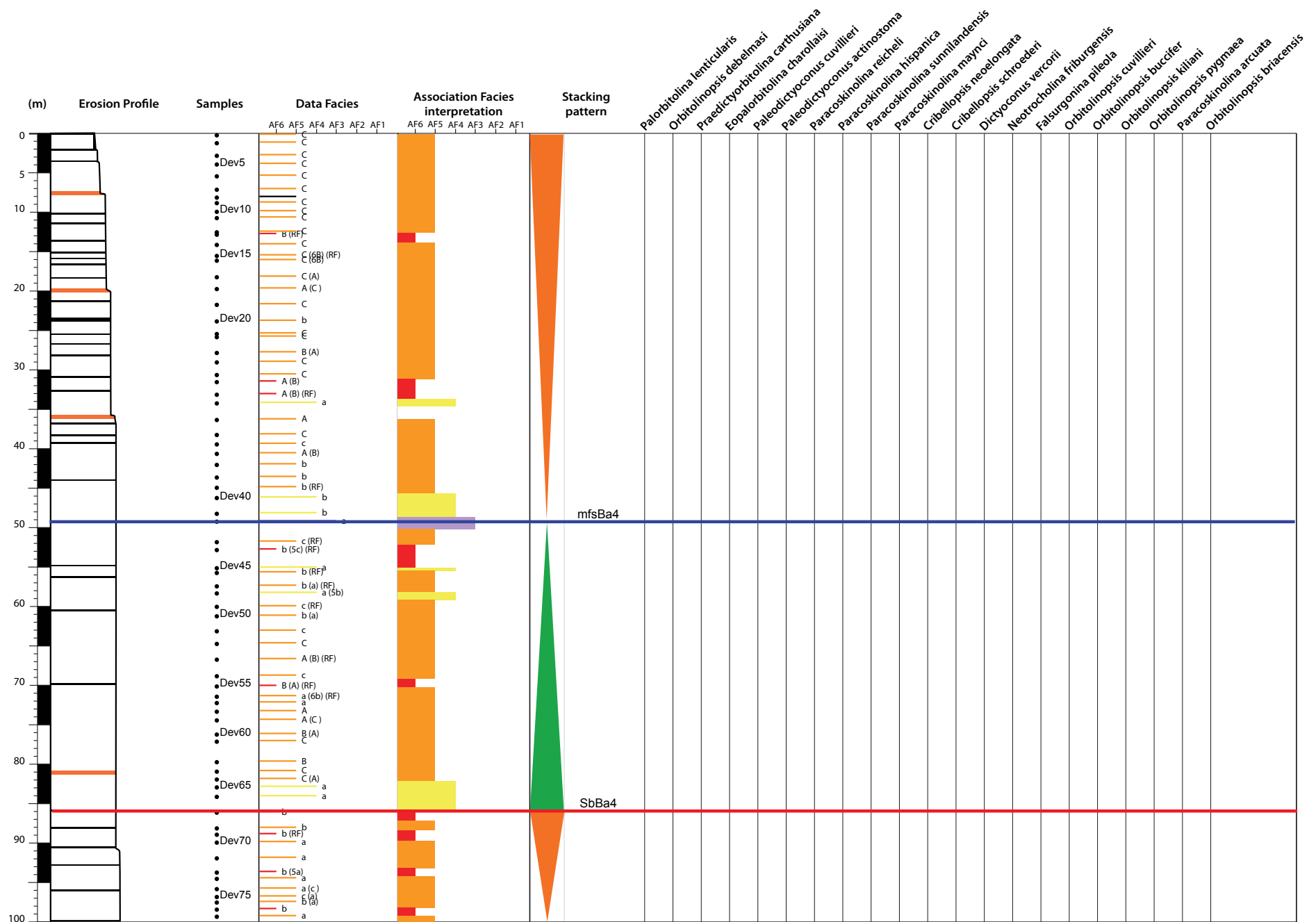
Annexe 44: Log stratigraphique du Puits de Barjac (Ardèche).

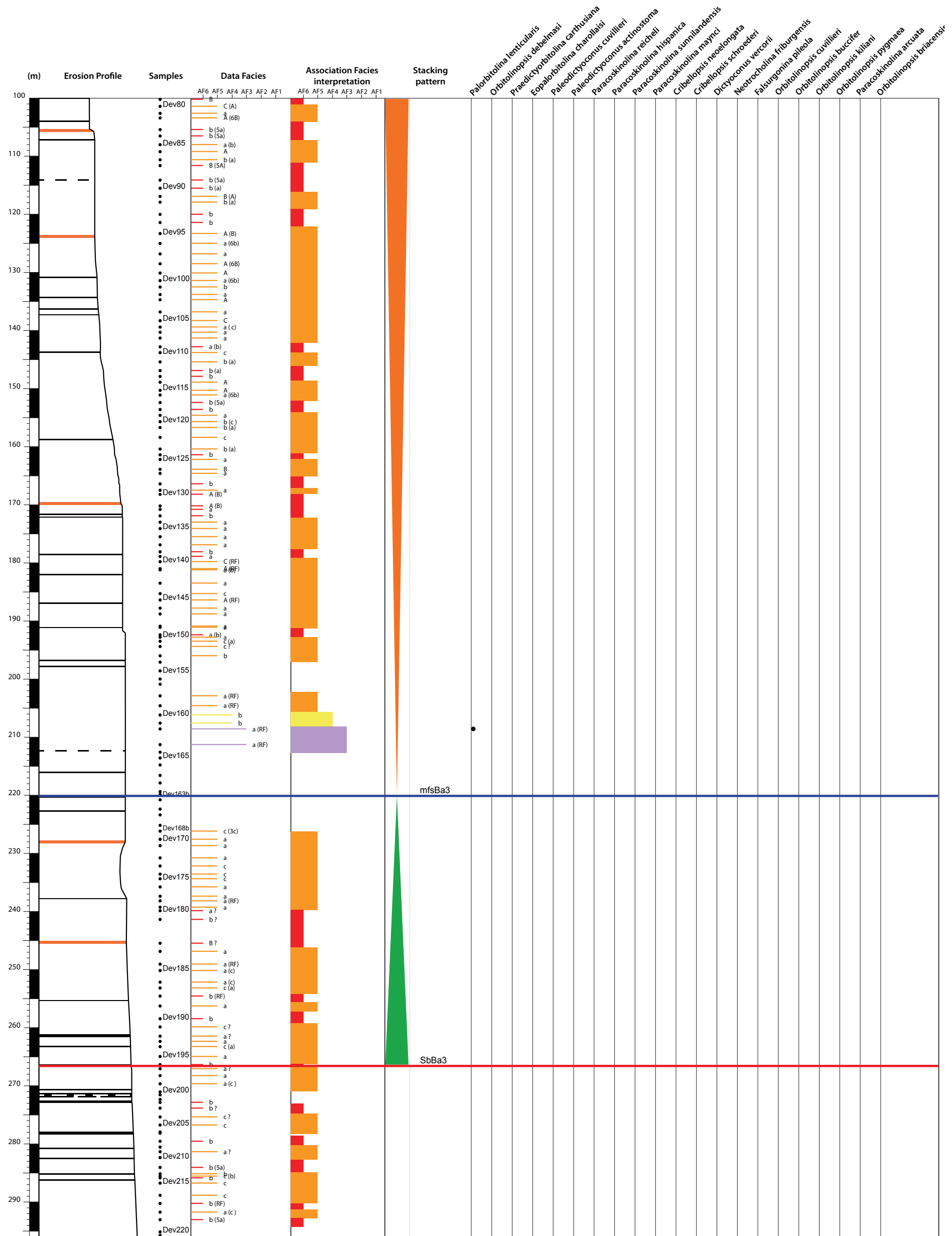


Annexe 45: Sommet du log stratigraphique de la coupe de la Candelle(Provence).

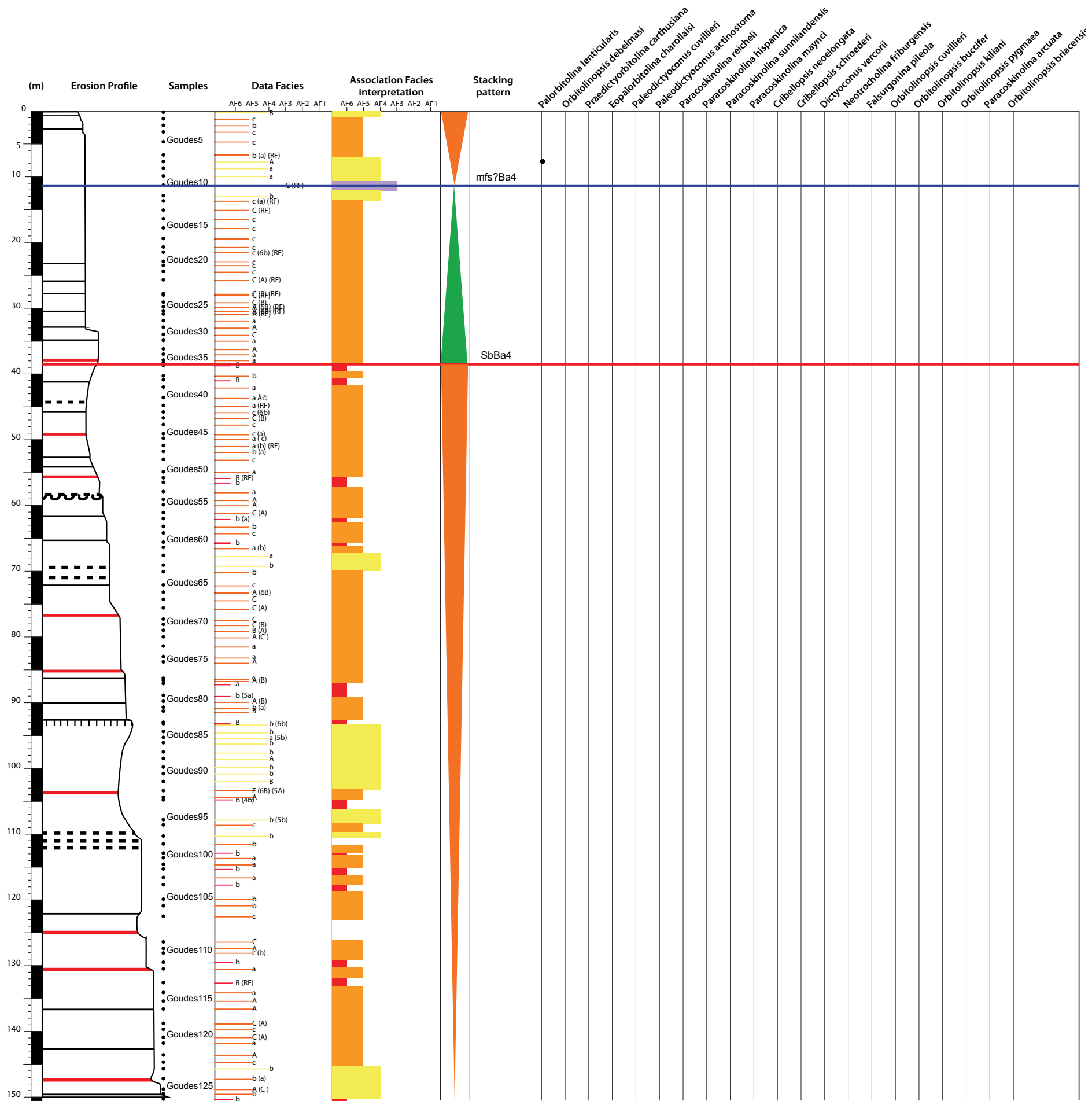


Annexe 46: Base du log stratigraphique de la coupe de la Candelle (Provence).



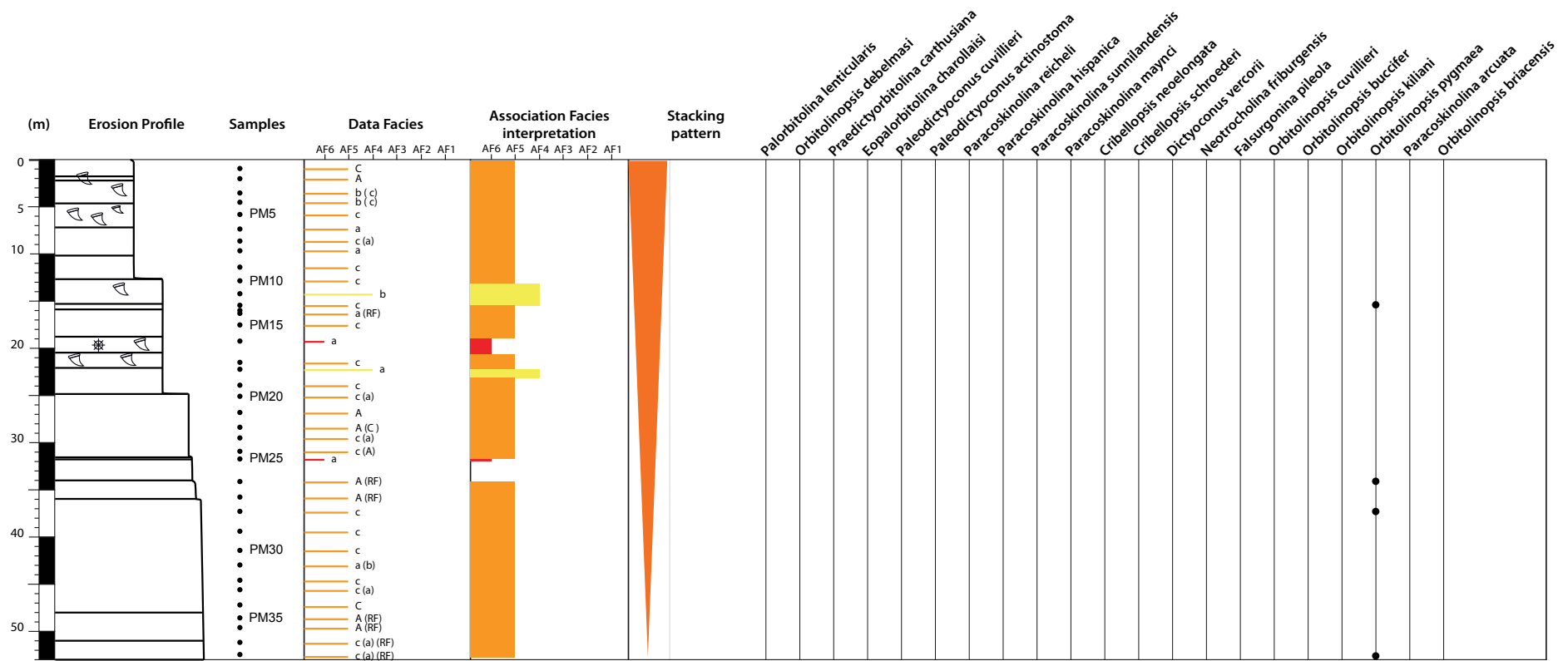


Annexe 47: Log stratigraphique de la coupe du Devonien (Provence).

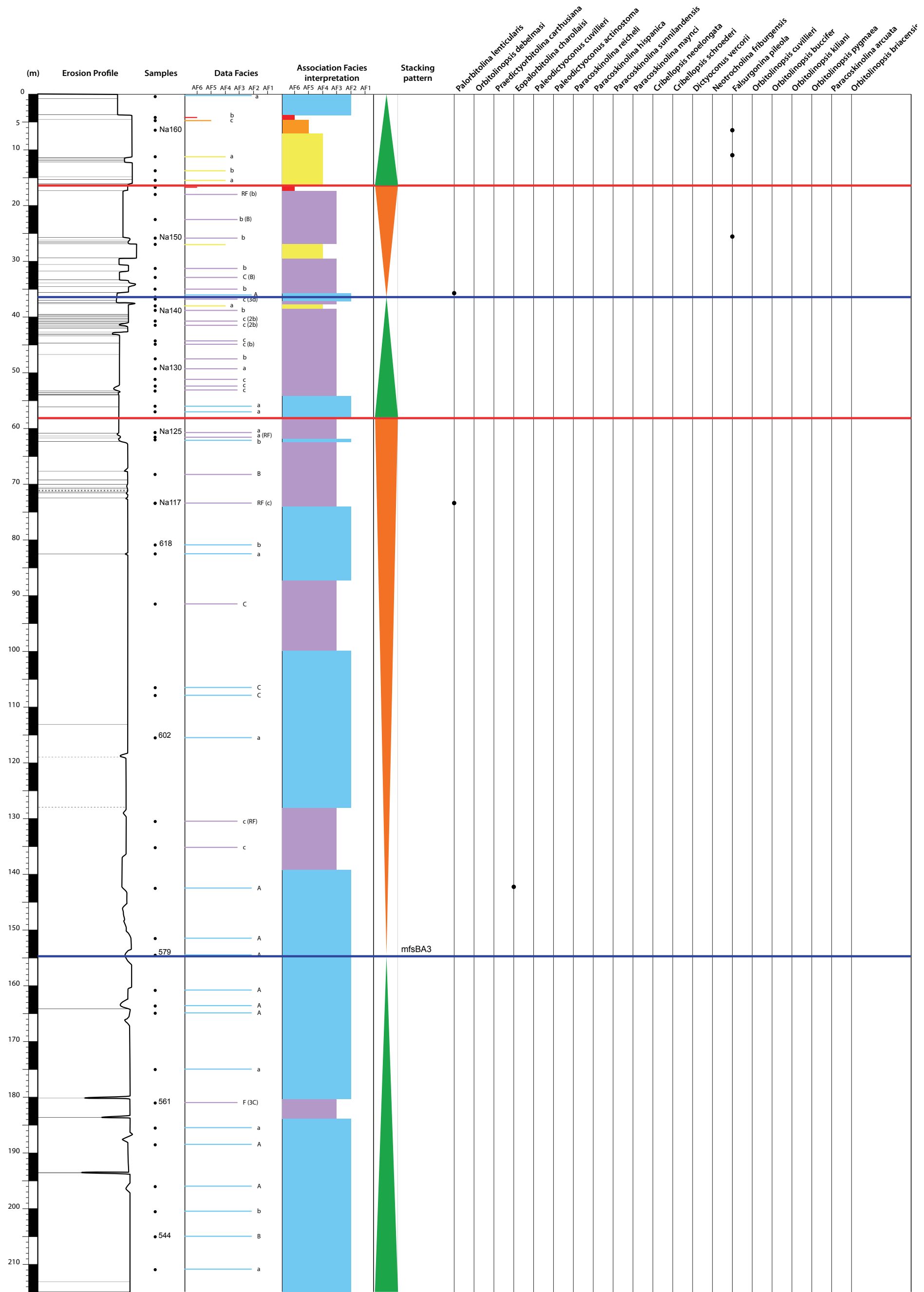


Annexe 48: Log stratigraphique de la coupe des Goudes (Provence).

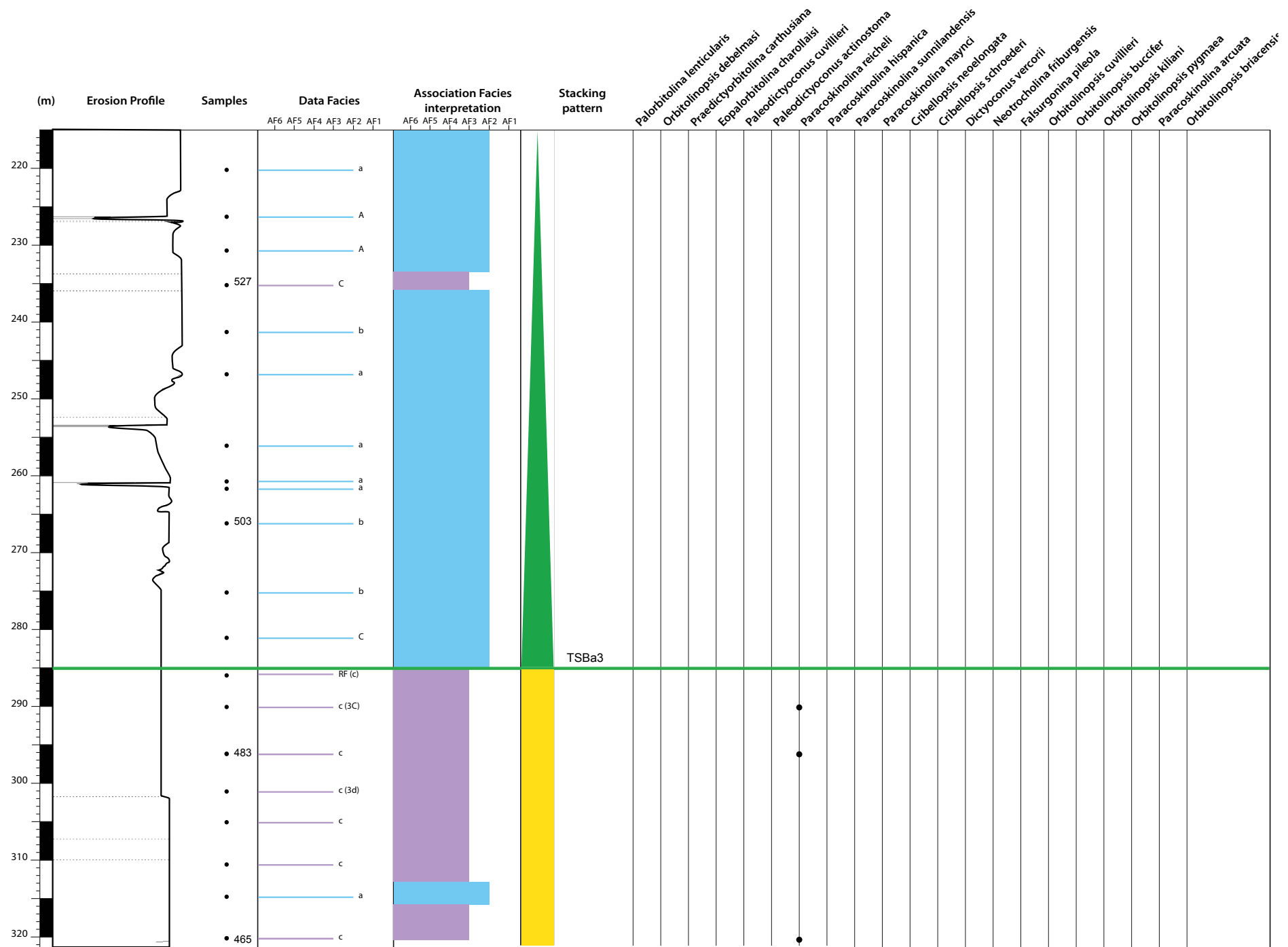




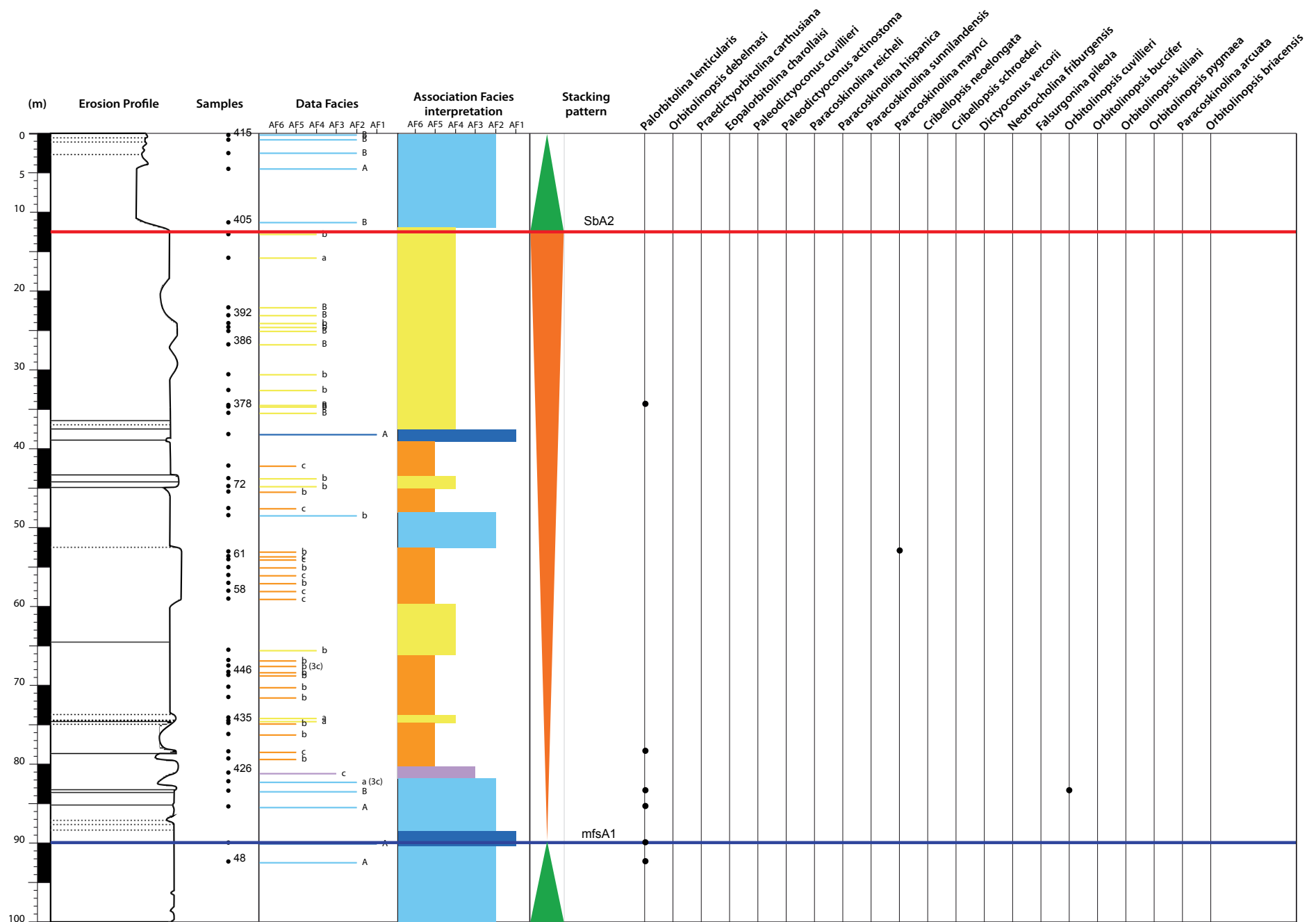
Annexe 49: Log stratigraphique de la coupe de Port-Miou (Provence).

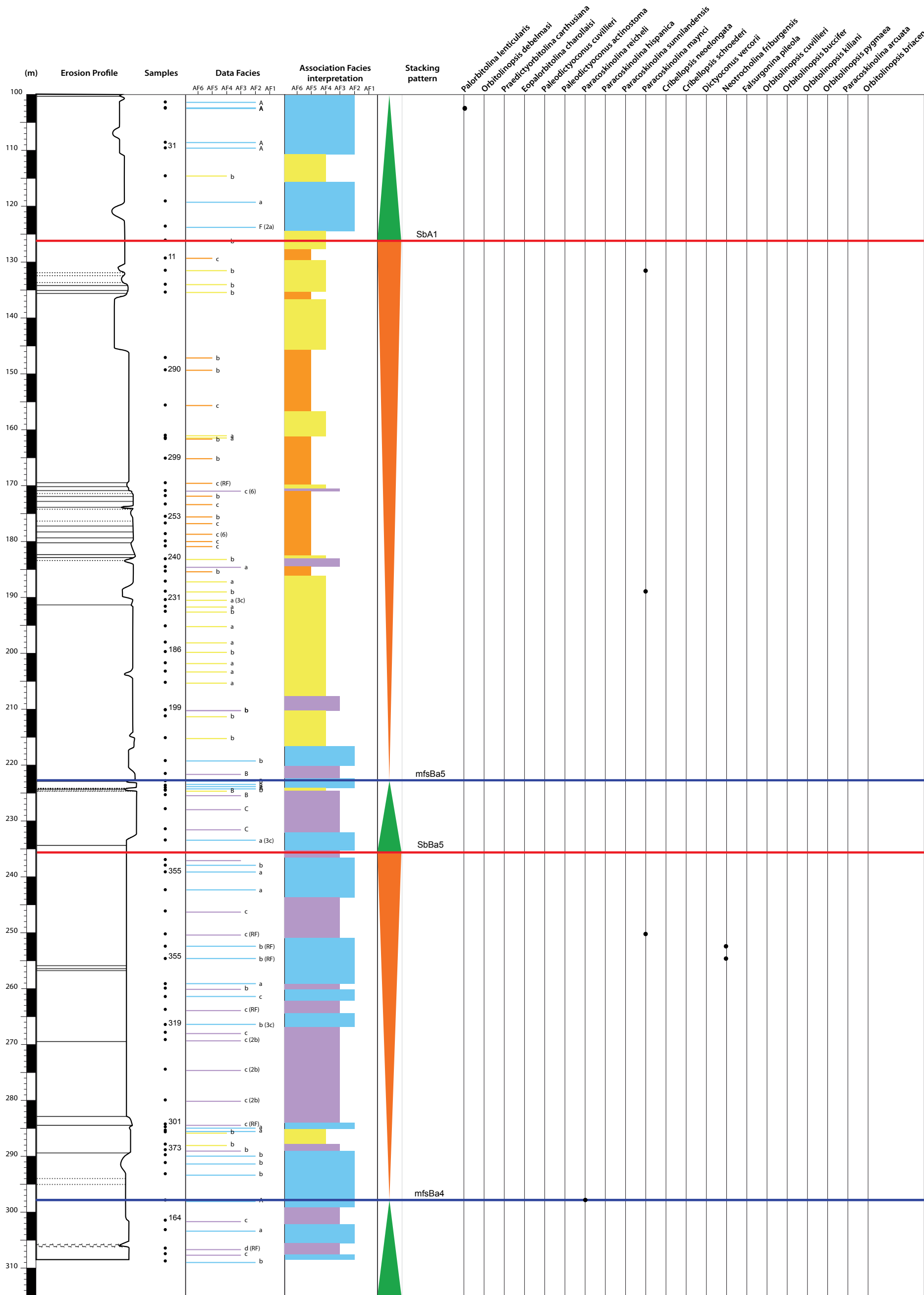


Annexe 50: Sommet du log stratigraphique de la coupe de Cire-Nesque (Vaucluse).

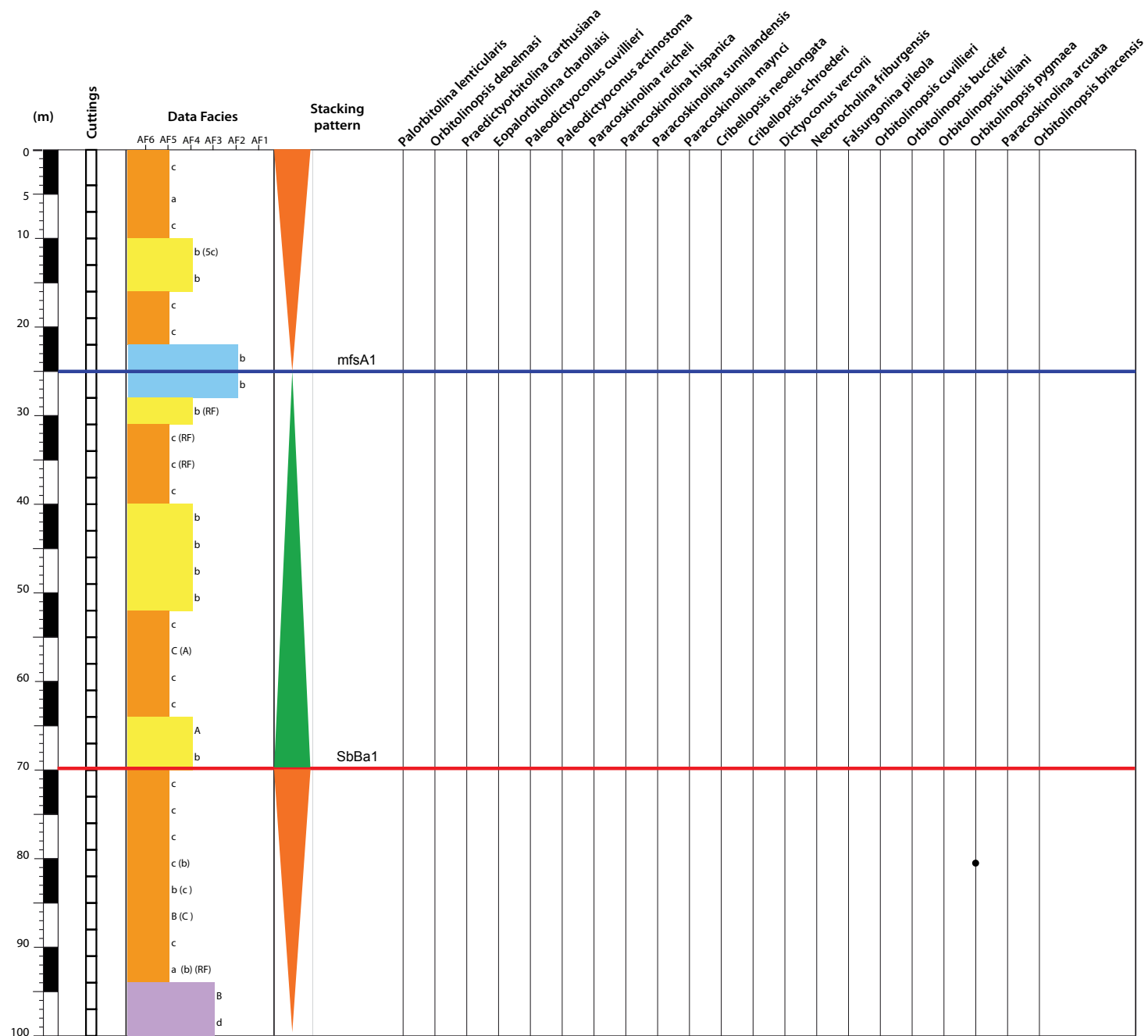


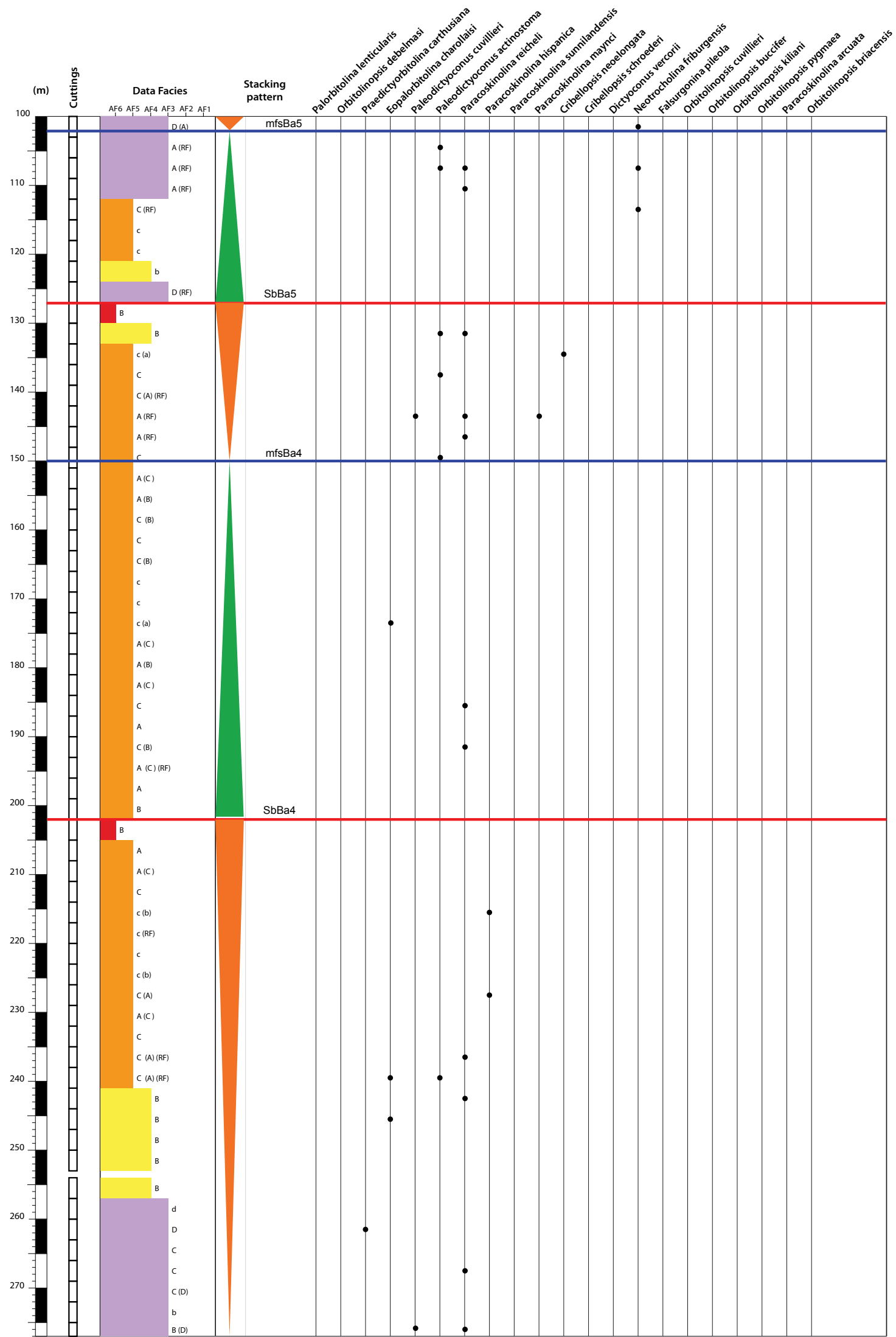
Annexe 51: Base du log stratigraphique de la coupe de Cire-Nesque (Vaucluse).





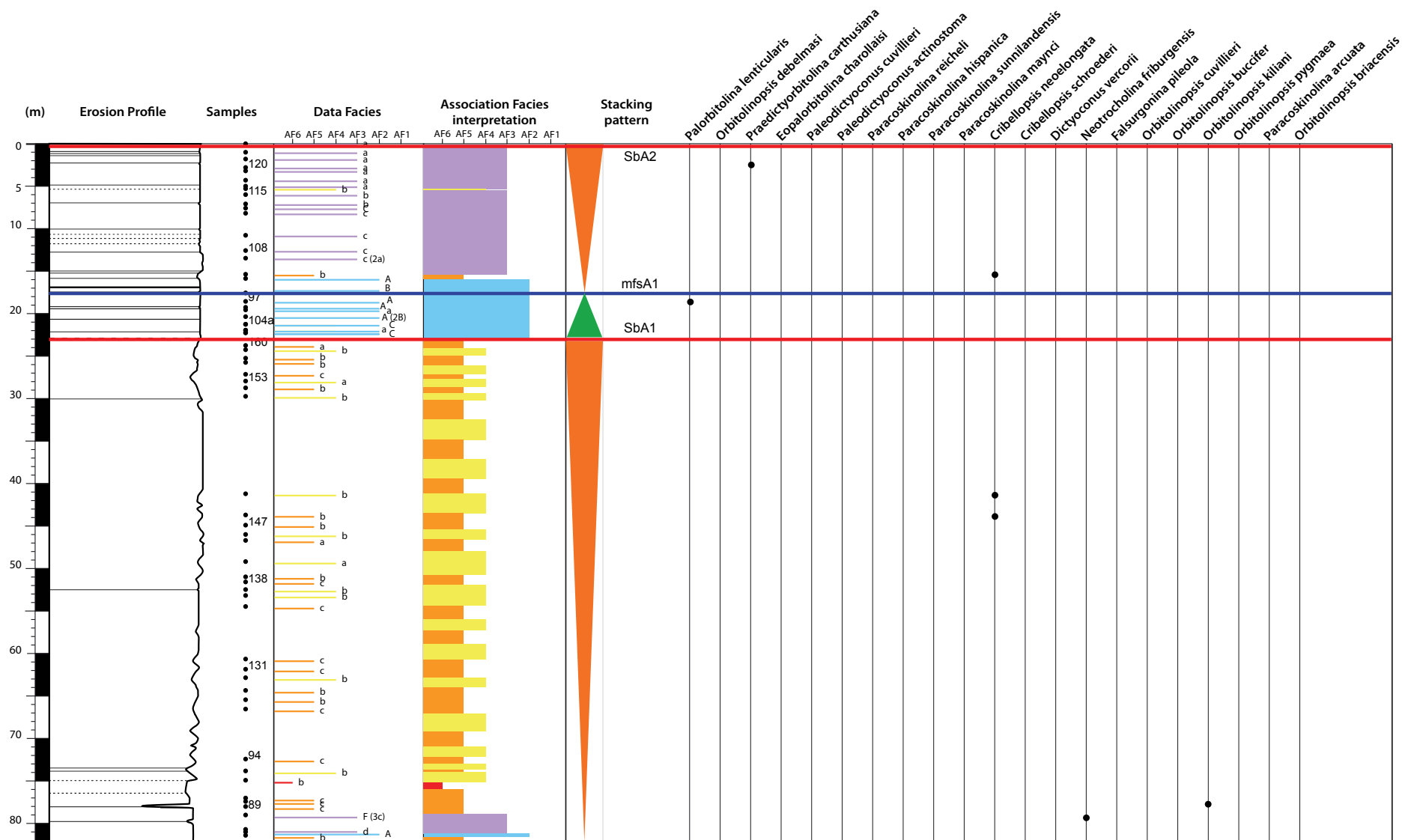
Annexe 52: Log stratigraphique de la coupe de Fontaine (Vaucluse).



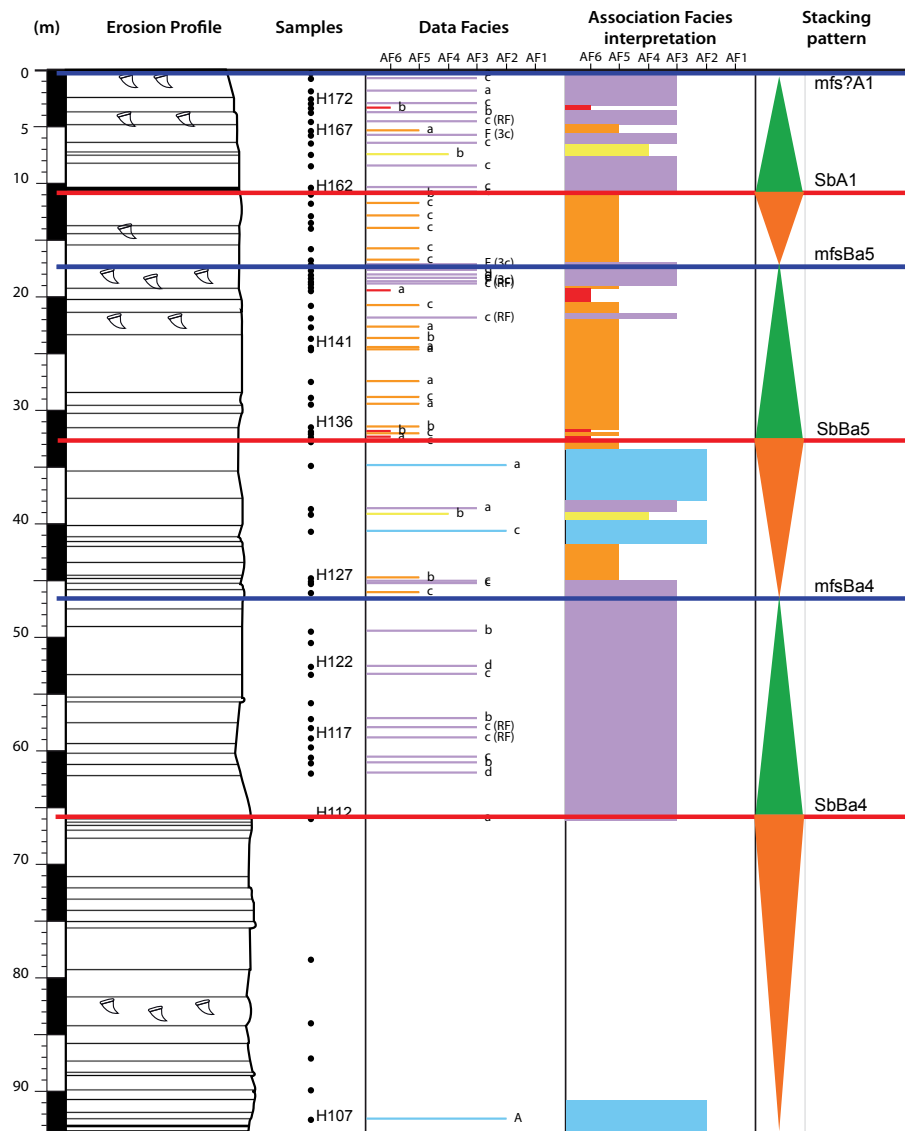


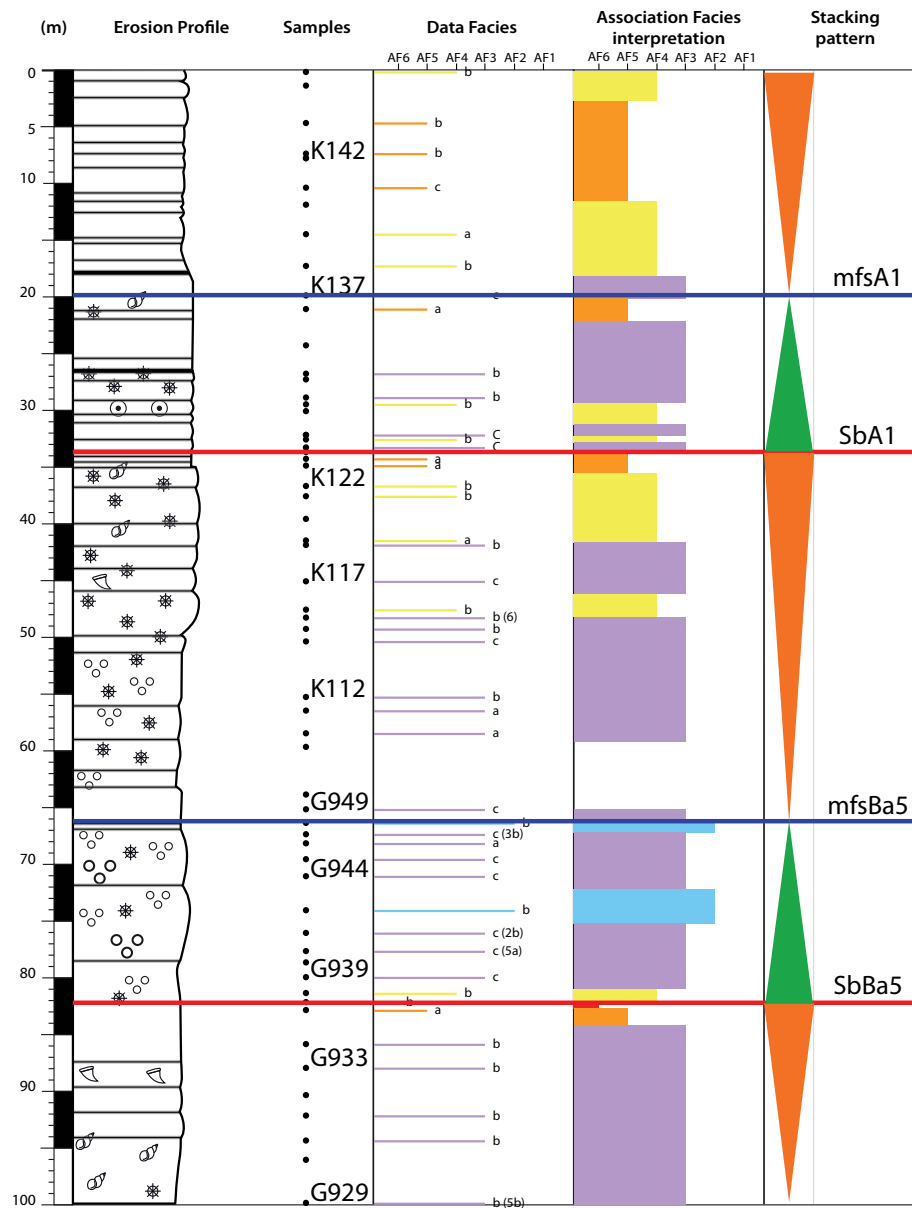
Annexe 53: Log stratigraphique du puits d'Orgon (Vaucluse).



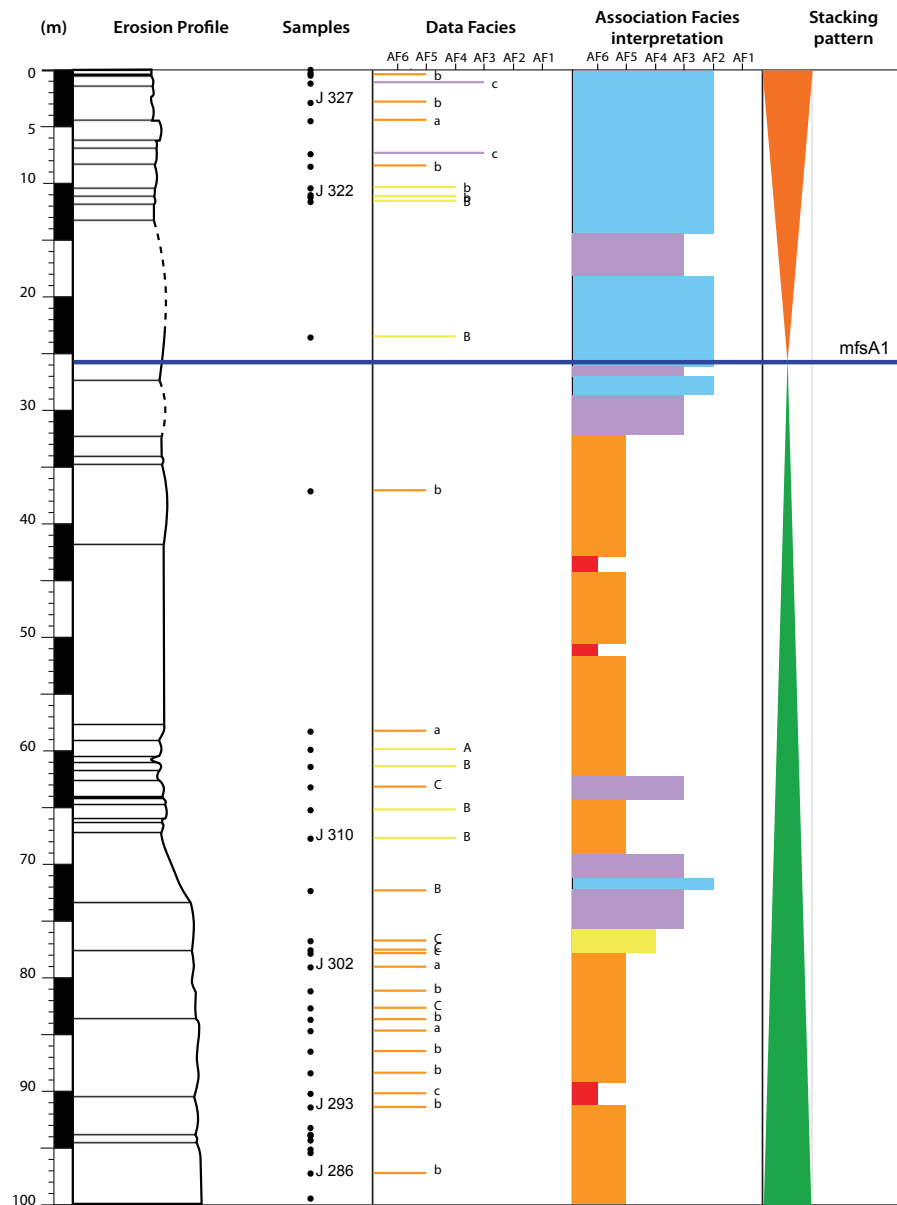


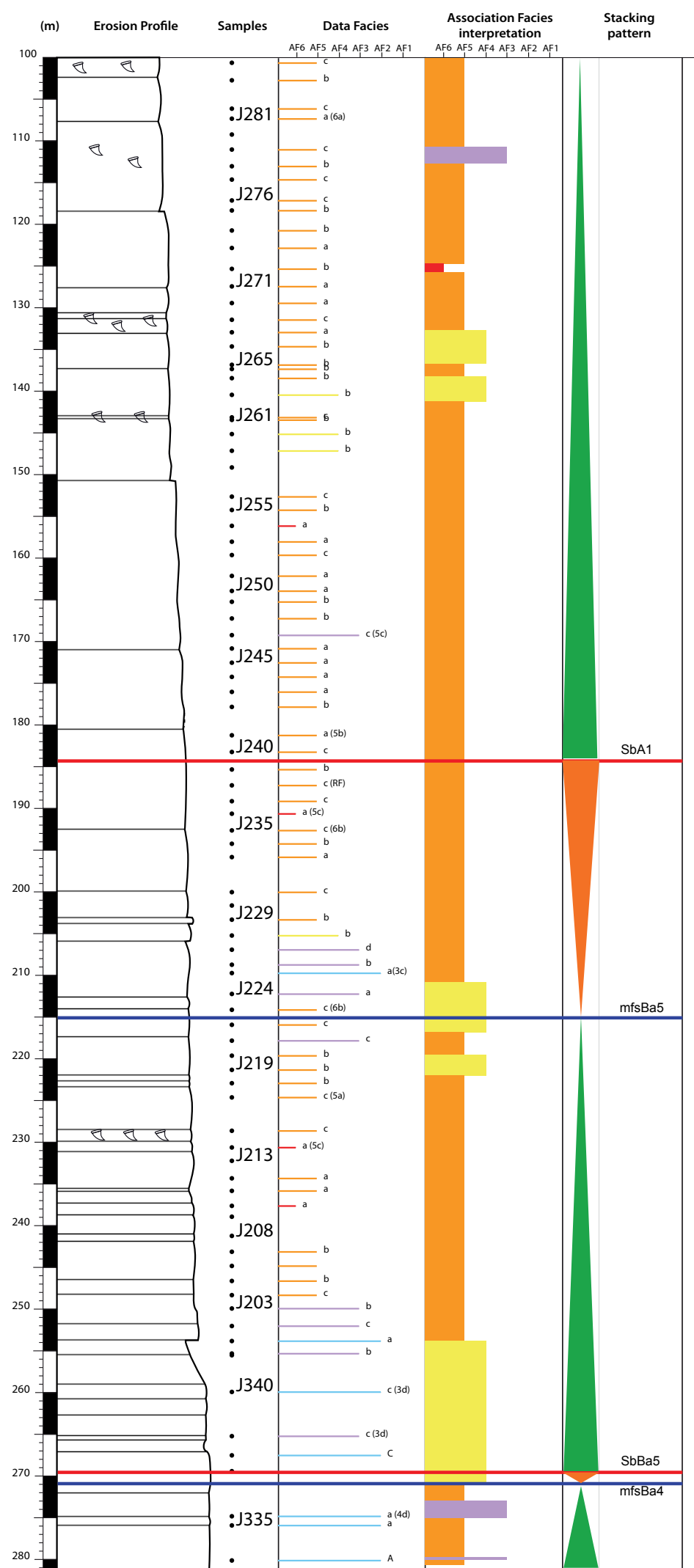
Annexe 54: Log stratigraphique de la coupe de Rustrel (Vaucluse).



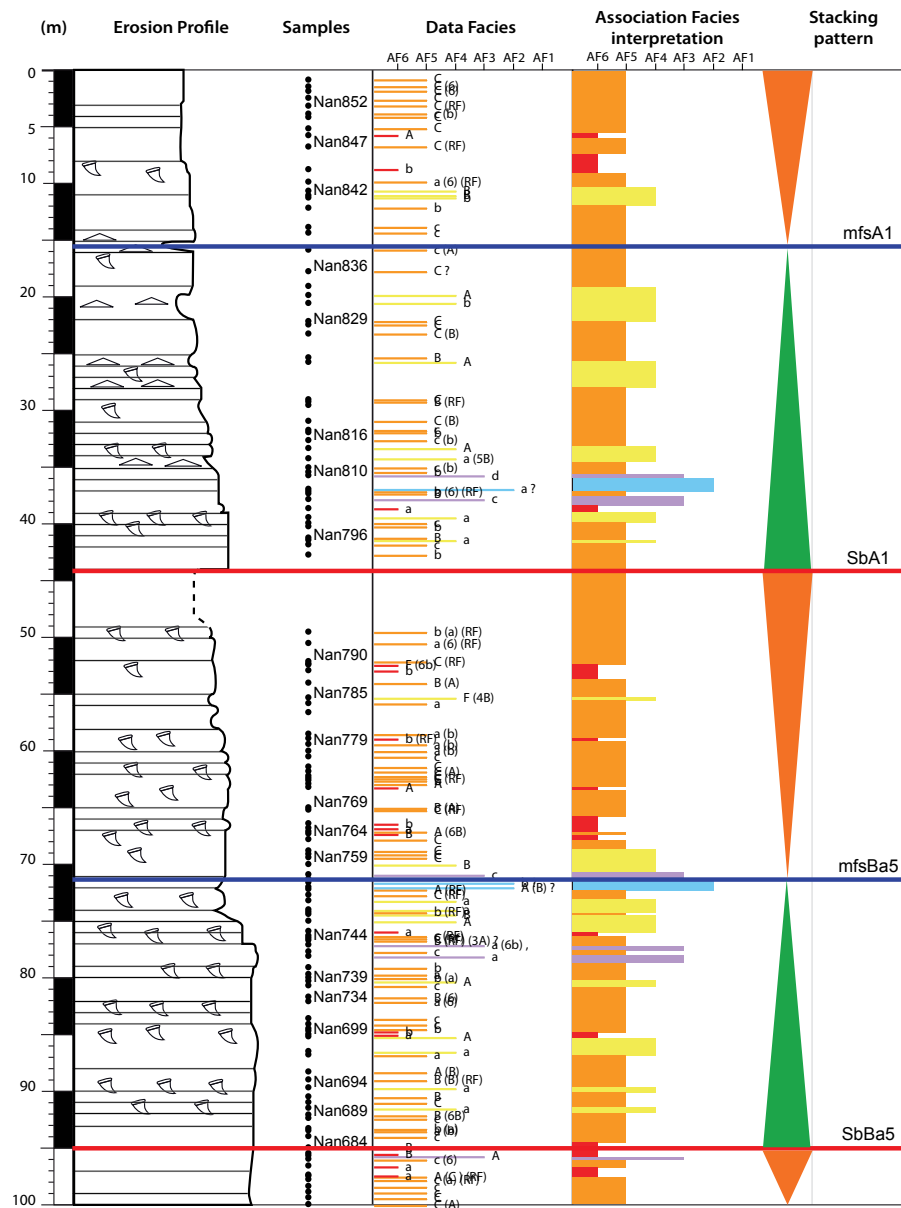




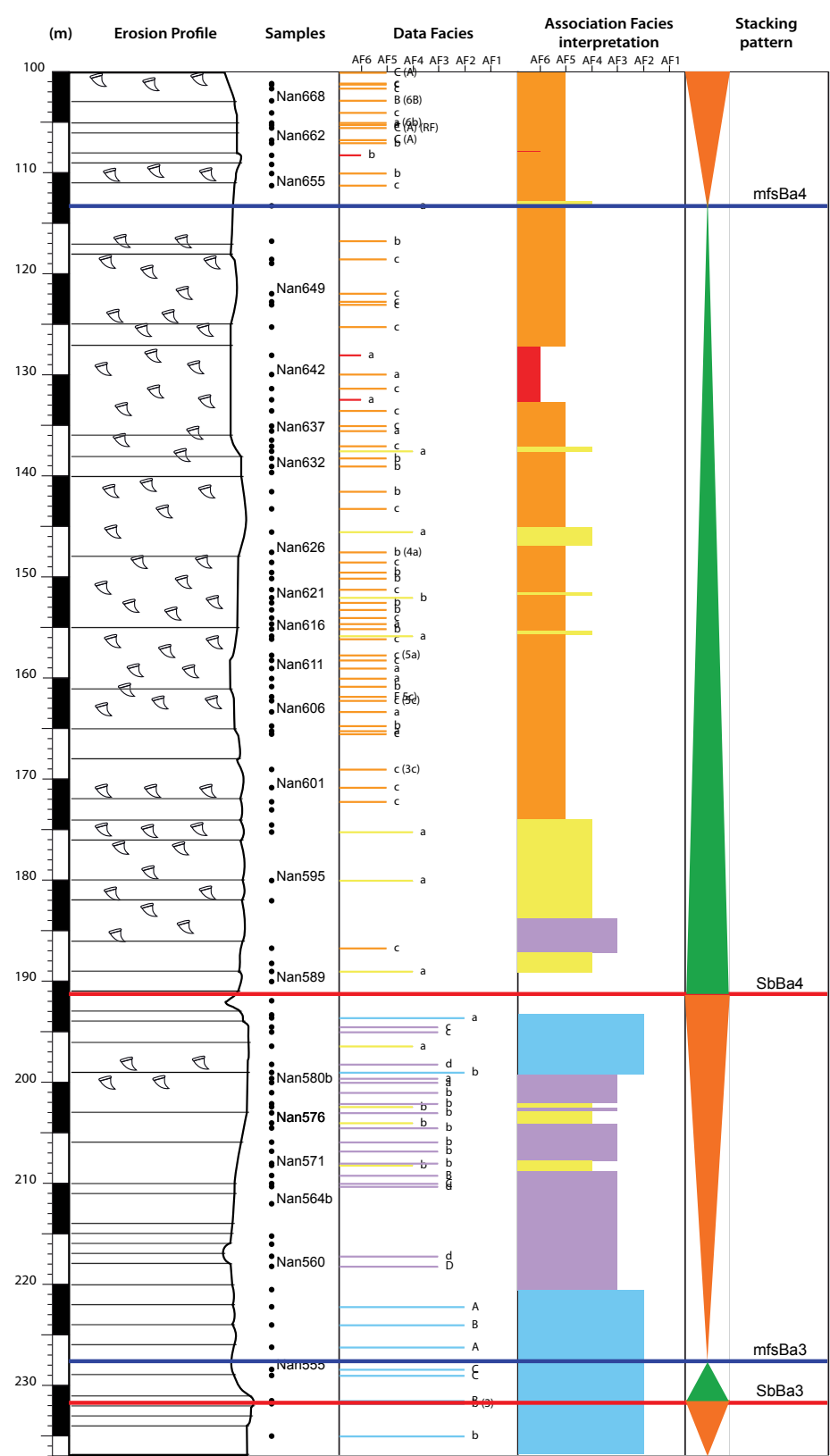




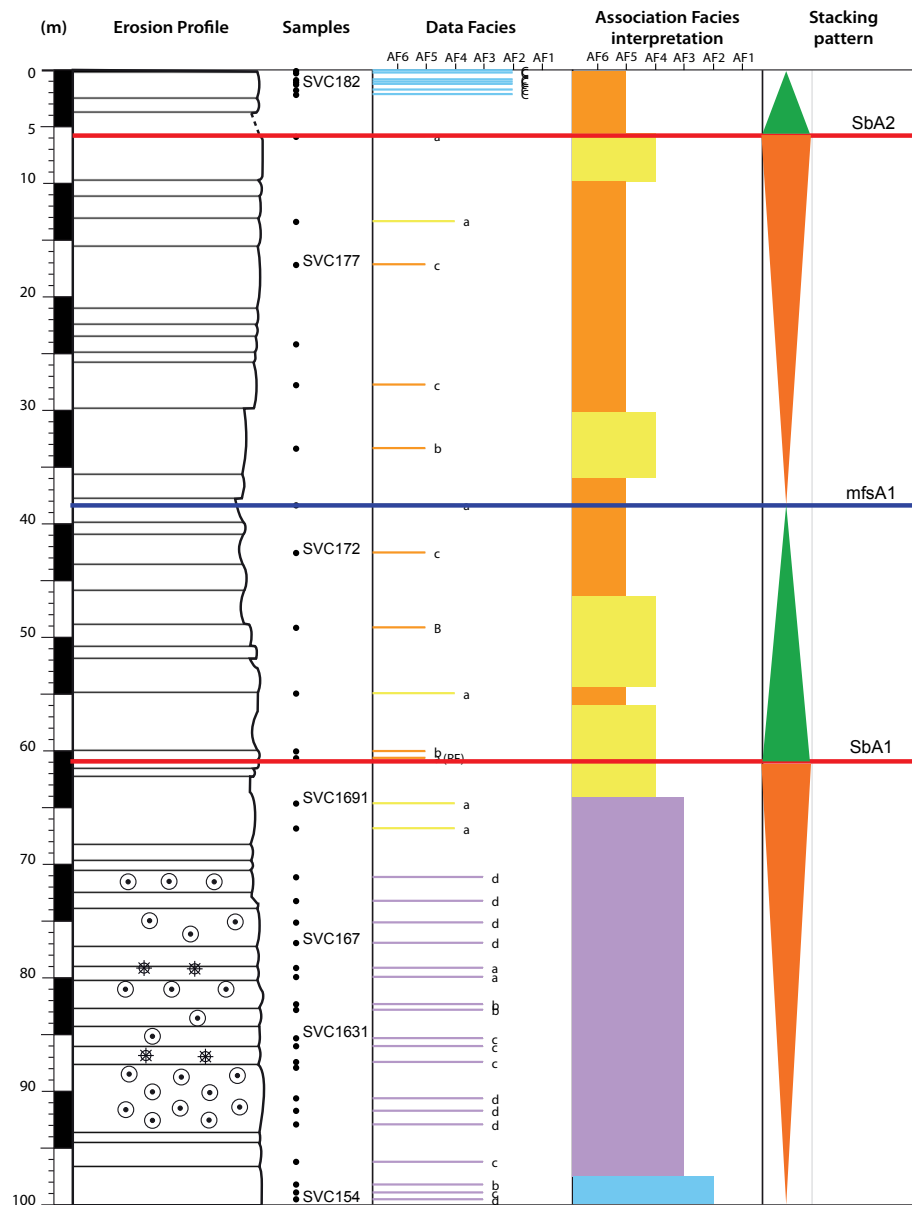
Annexe 57: Log stratigraphique de la coupe du Mortier (Vercors).

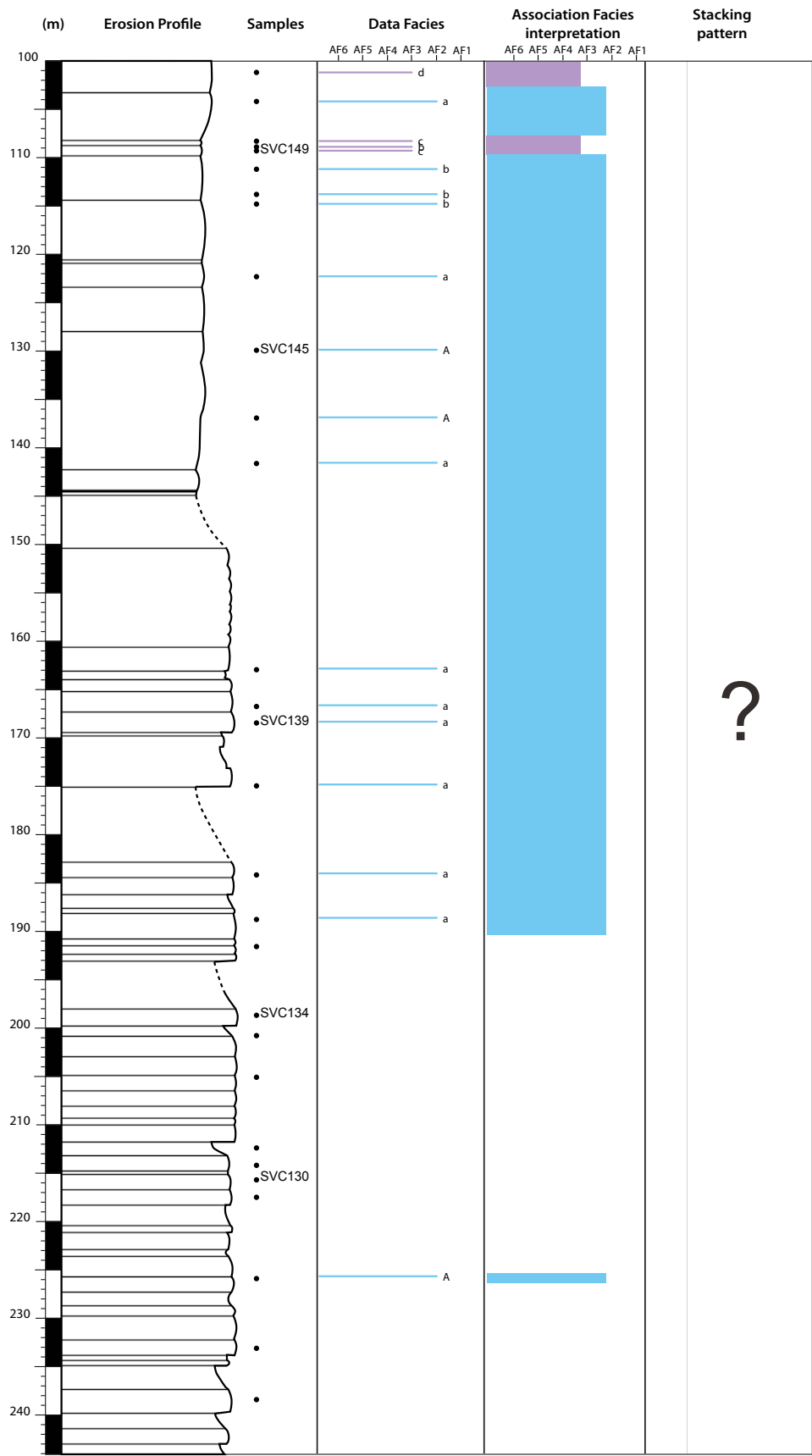




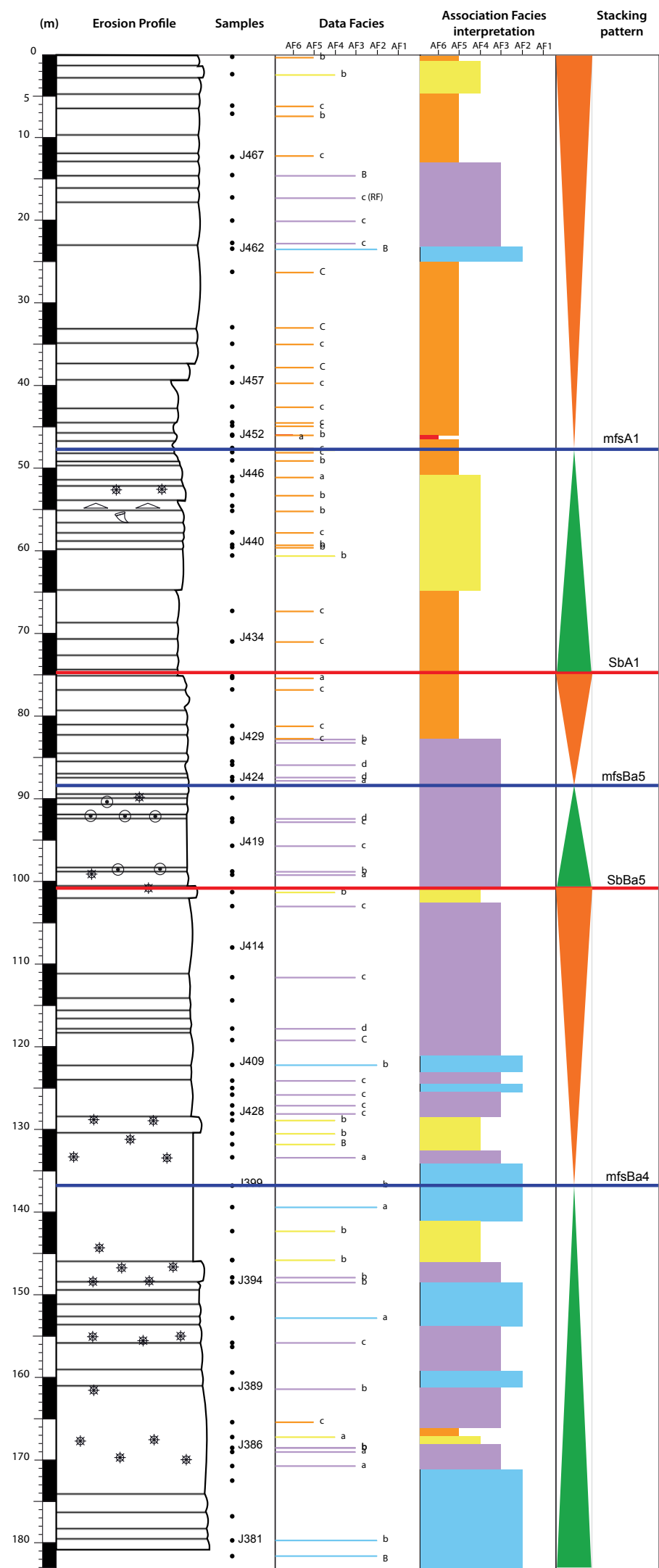


Annexe 58: Log stratigraphique de la coupe du Nan (Vercors).



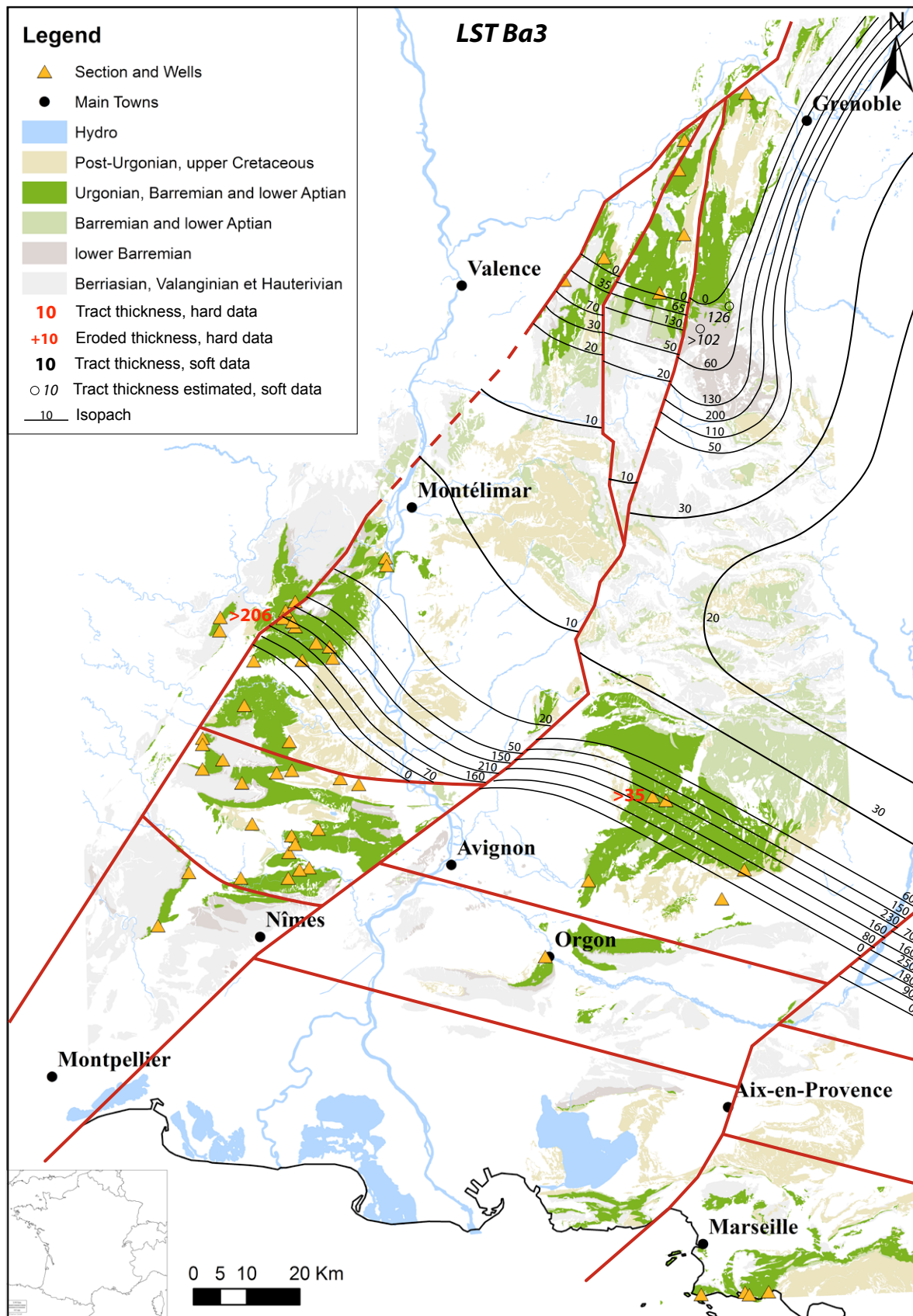


Annexe 59: Log stratigraphique de la coupe de Saint Vincent de la Commanderie (Vercors).

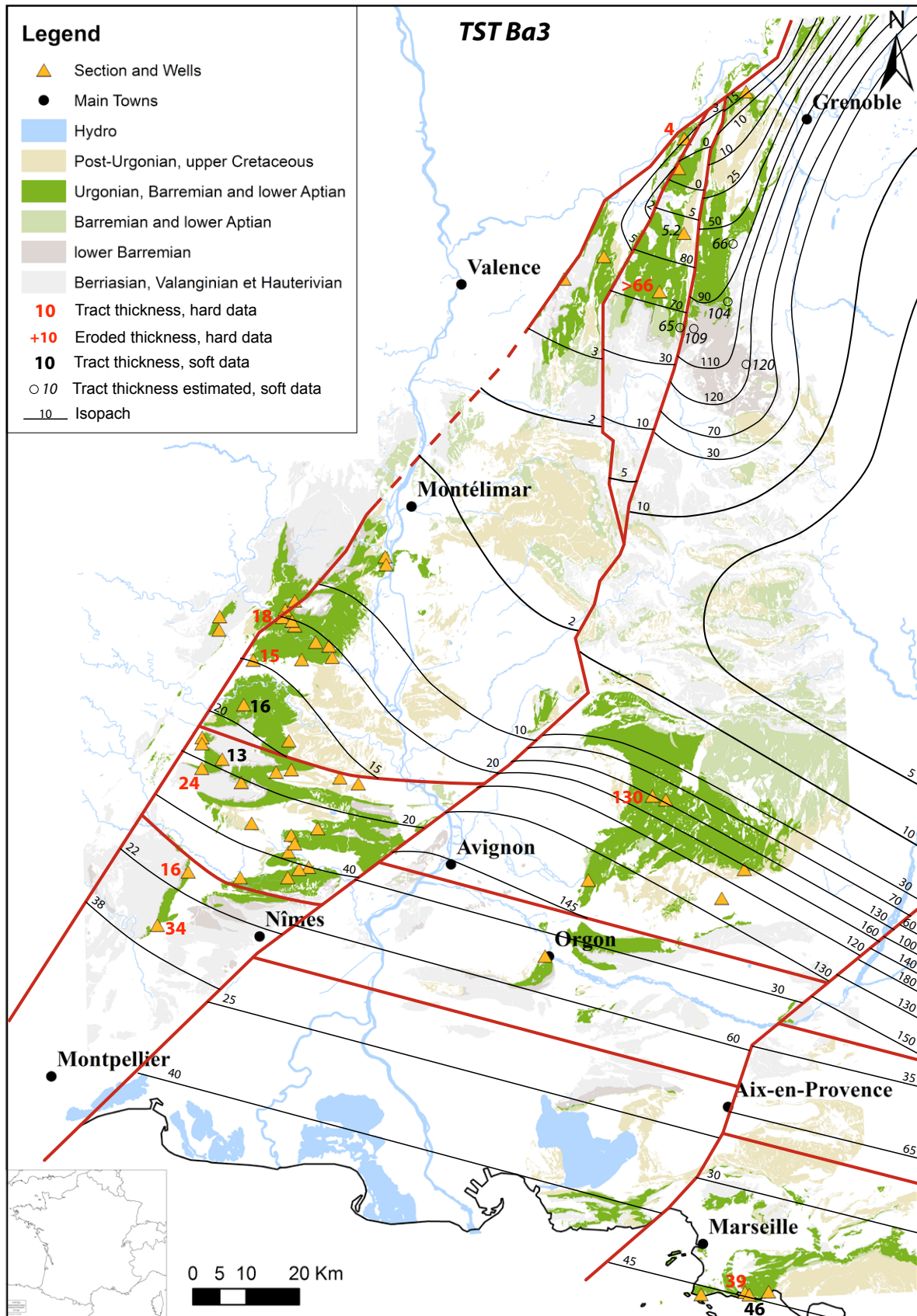


Annexe 60: Log stratigraphique de la coupe de Fogés (Vercors).

## 2 LES CARTES D'ÉPAISSEUR, D'ÉROSION ET DE PALÉO-PROFONDEUR D'EAU

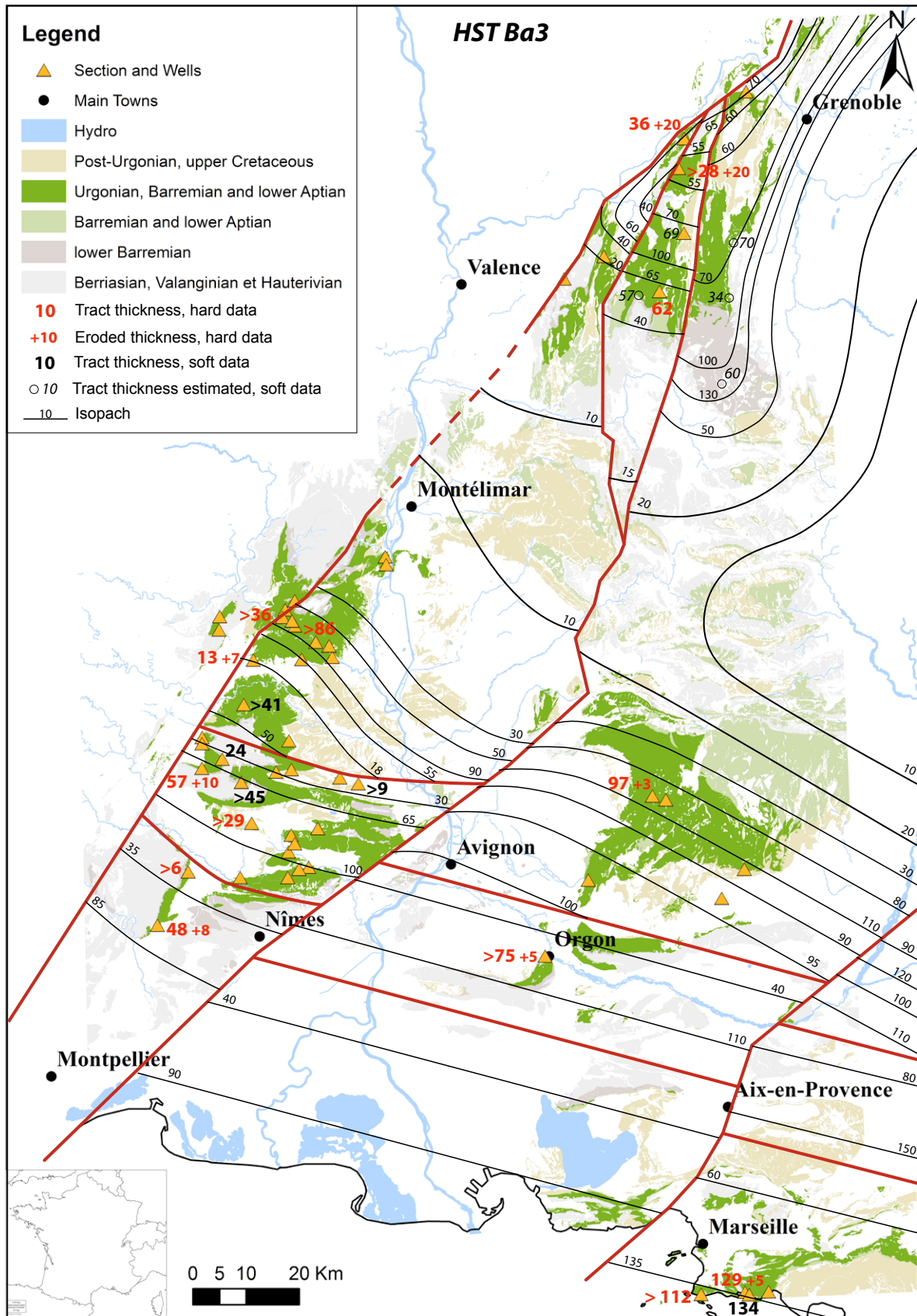


Annexe 61 : Carte d'épaisseur du cortège de bas niveau de la séquence Ba3.



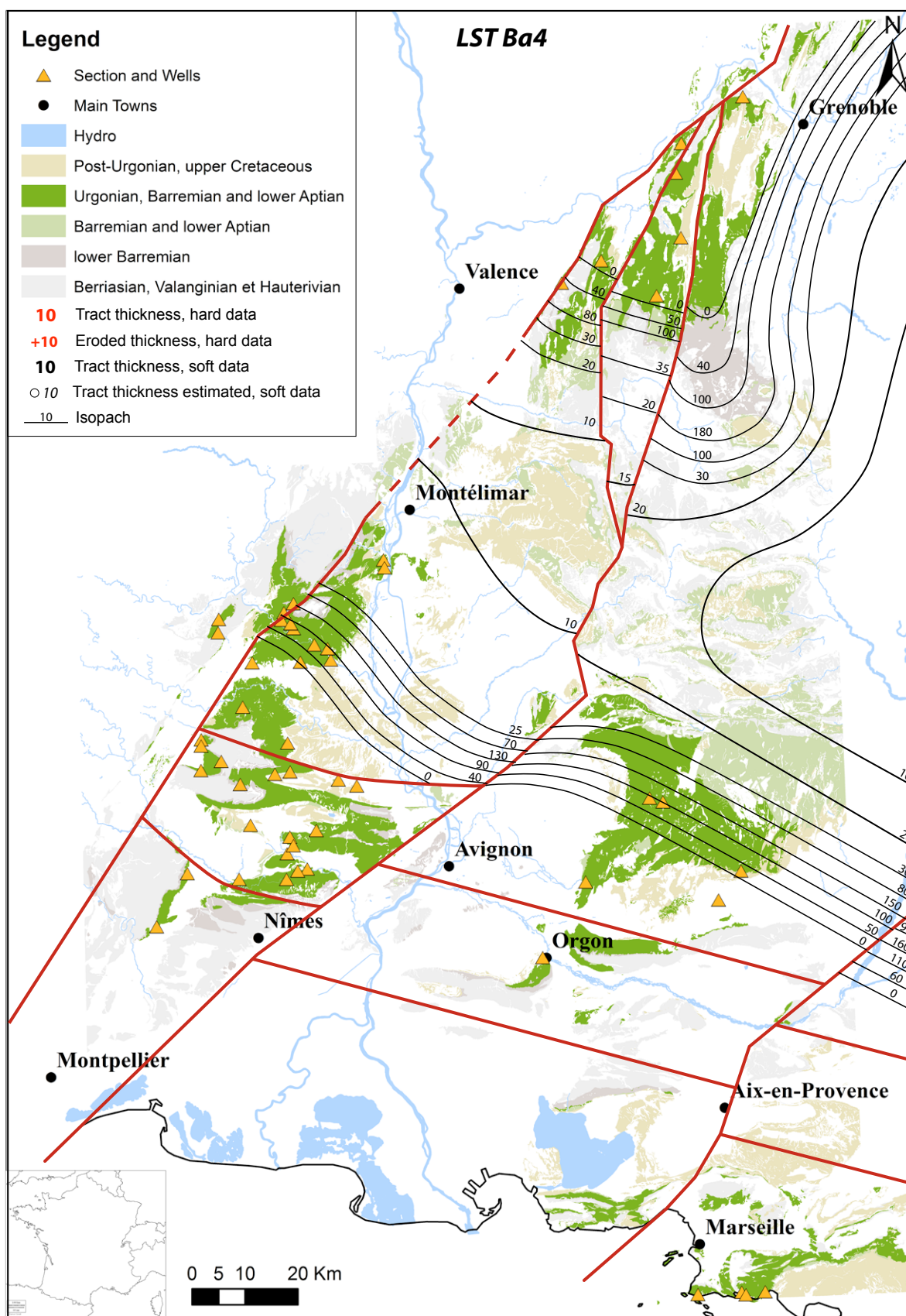
Annexe 62 : Carte d'épaisseur du cortège transgressif de la séquence Ba3.



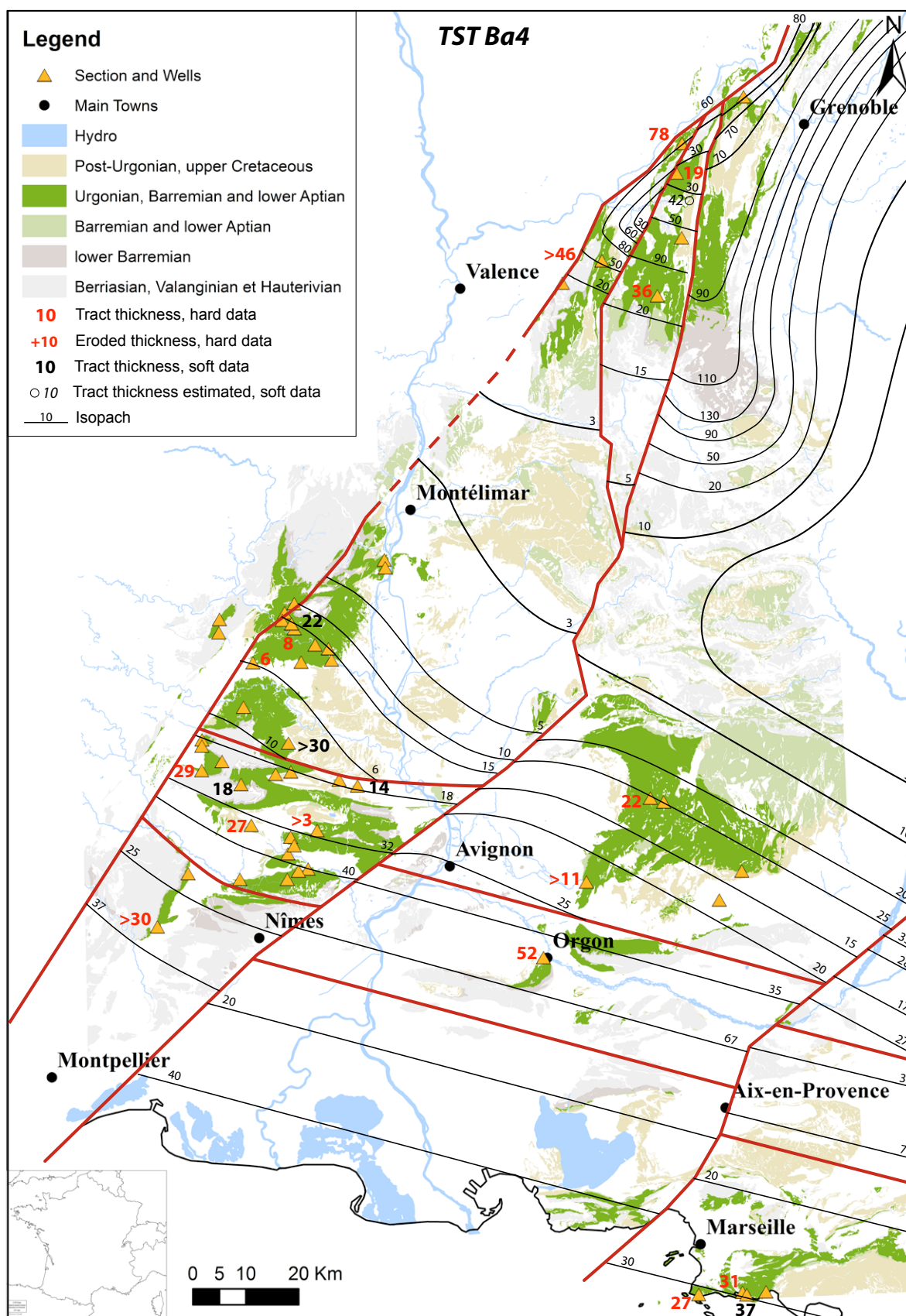


Annexe 63 : Carte d'épaisseur du cortège de haut niveau de la séquence Ba3.



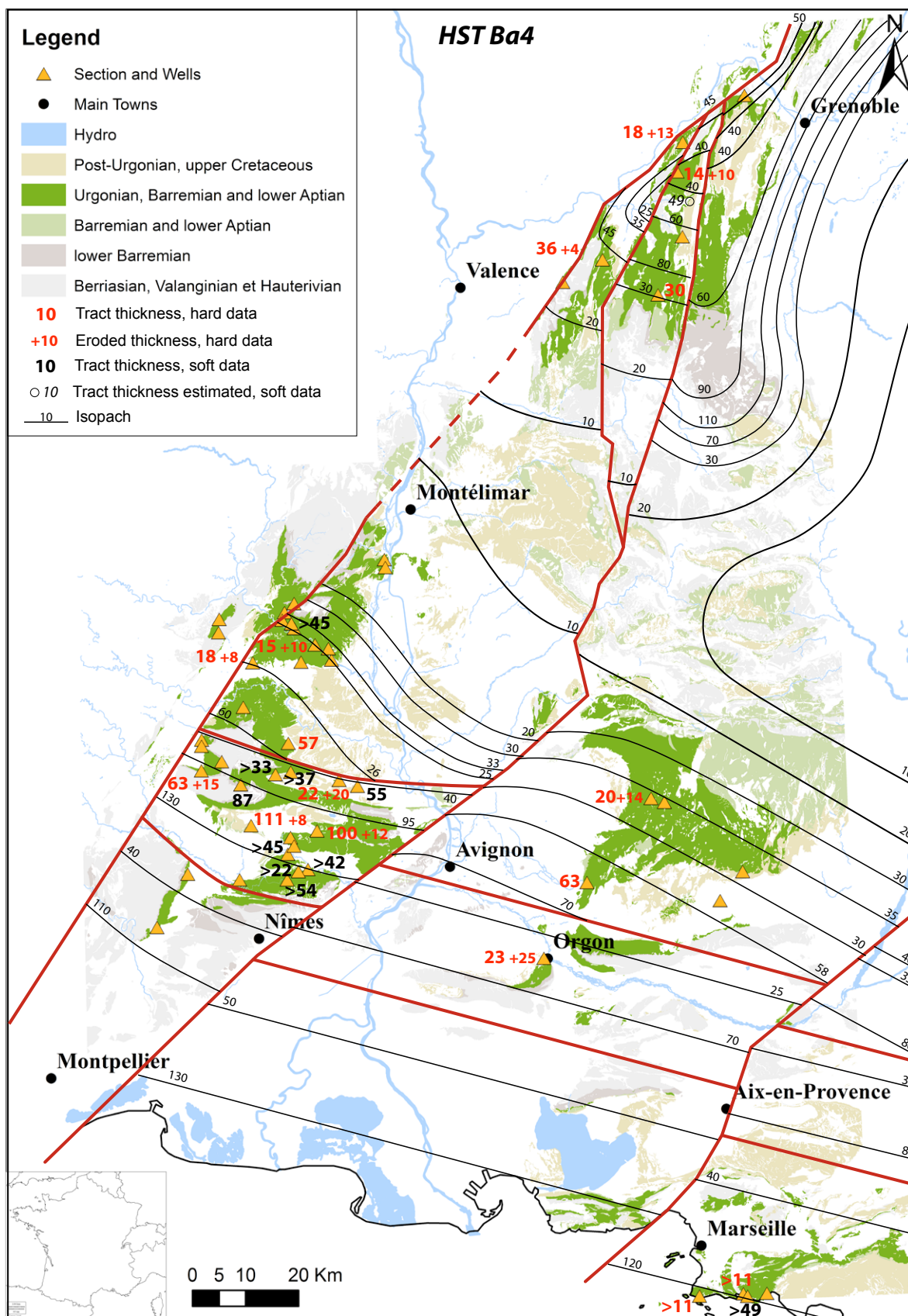


Annexe 64 : Carte d'épaisseur du cortège de bas niveau de la séquence Ba4.

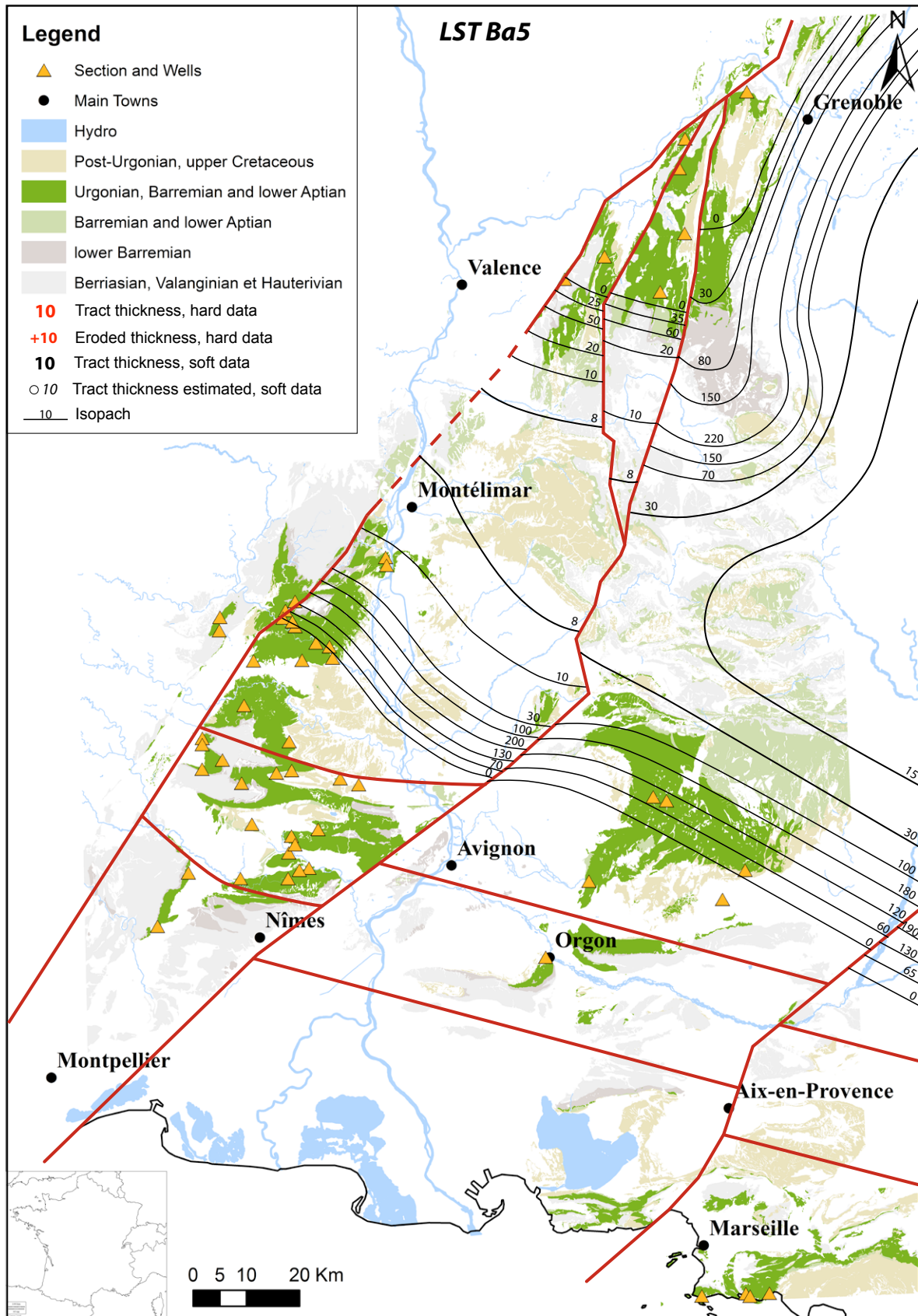


Annexe 65 : Carte d'épaisseur du cortège transgressif de la séquence Ba4.



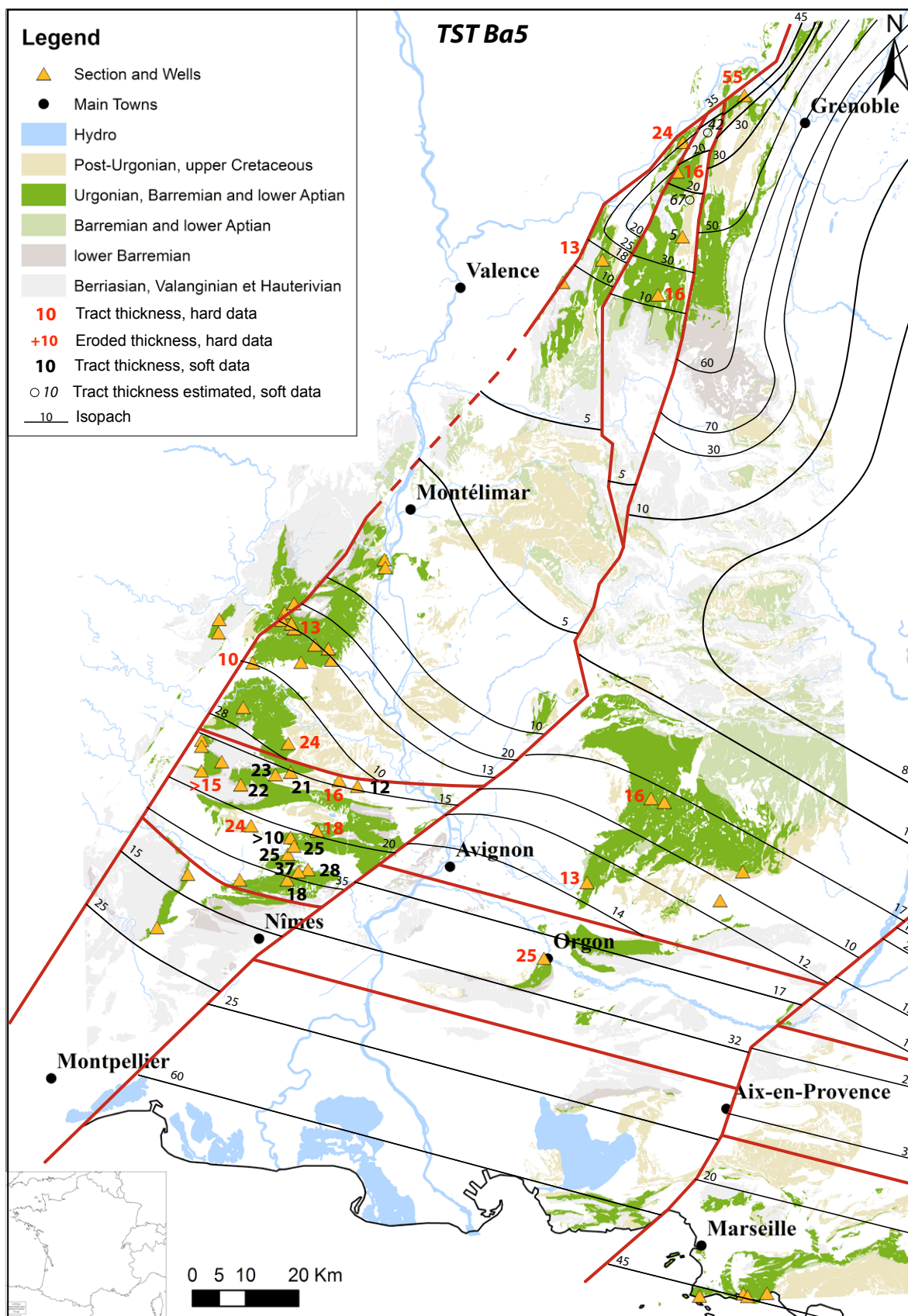


Annexe 66 : Carte d'épaisseur du cortège de haut niveau de la séquence Ba4.

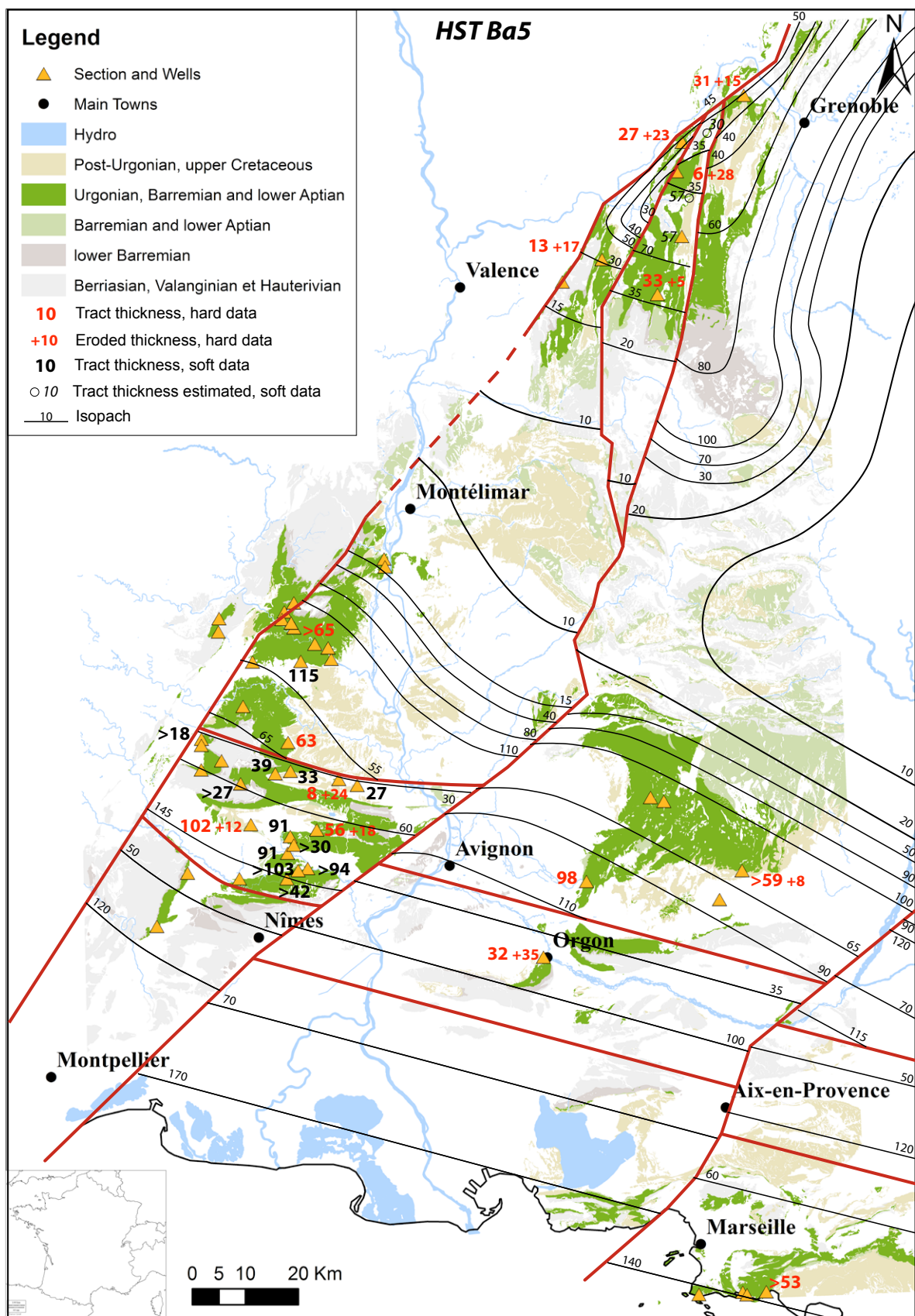


Annexe 67 : Carte d'épaisseur du cortège de bas niveau de la séquence Ba5.



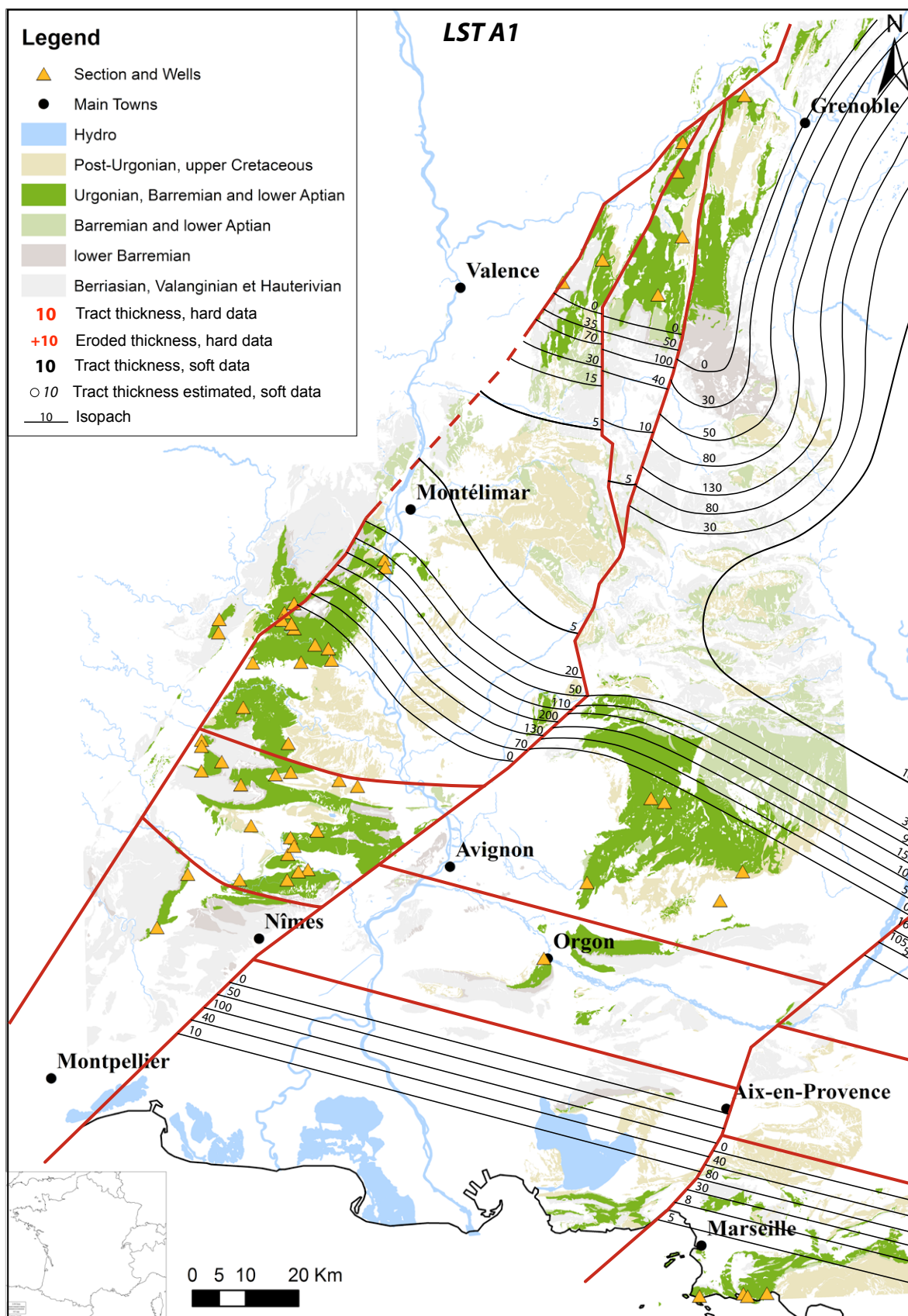


Annexe 68 : Carte d'épaisseur du cortège transgressif de la séquence Ba5.

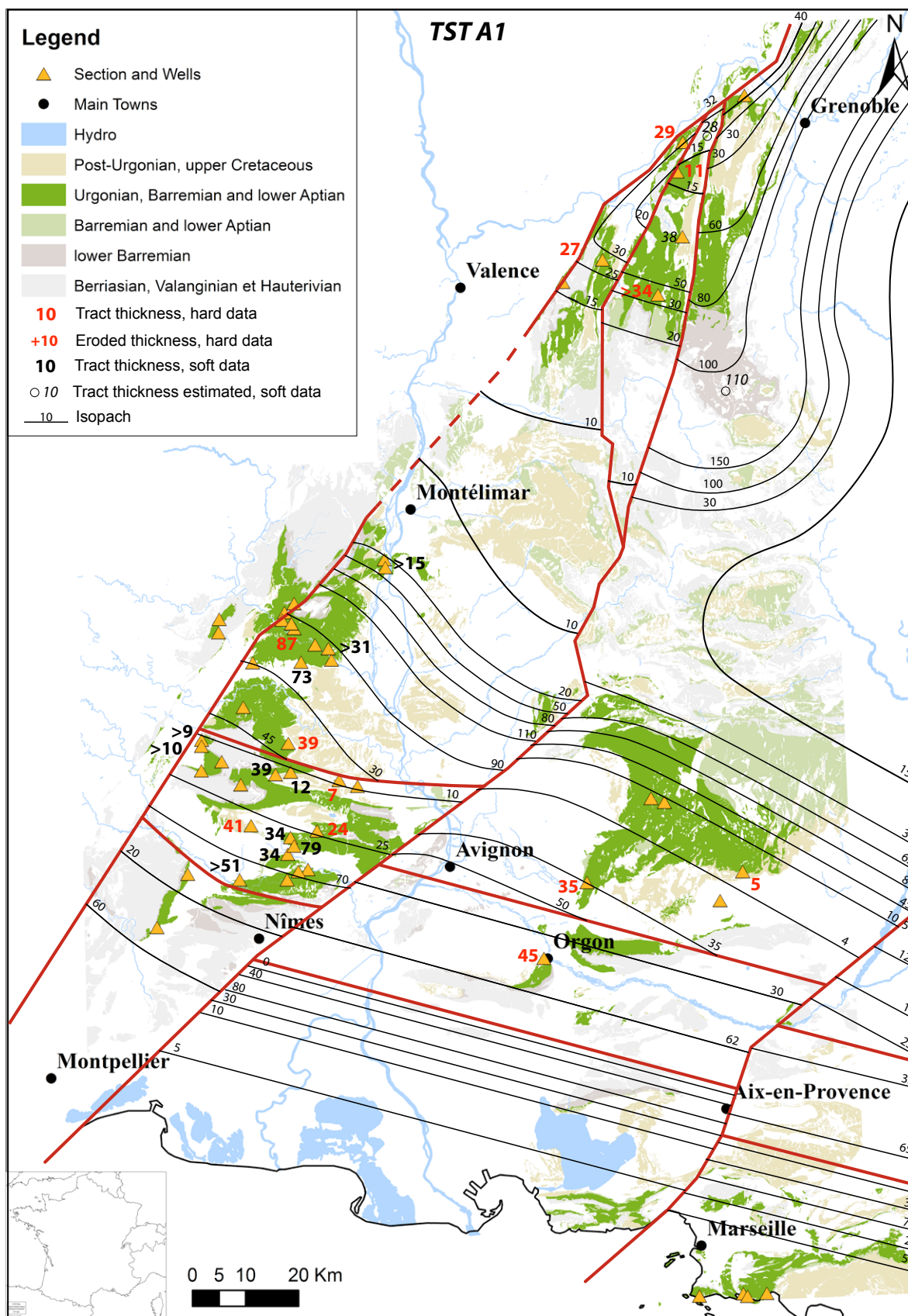


Annexe 69 : Carte d'épaisseur du cortège de haut niveau de la séquence Ba5.



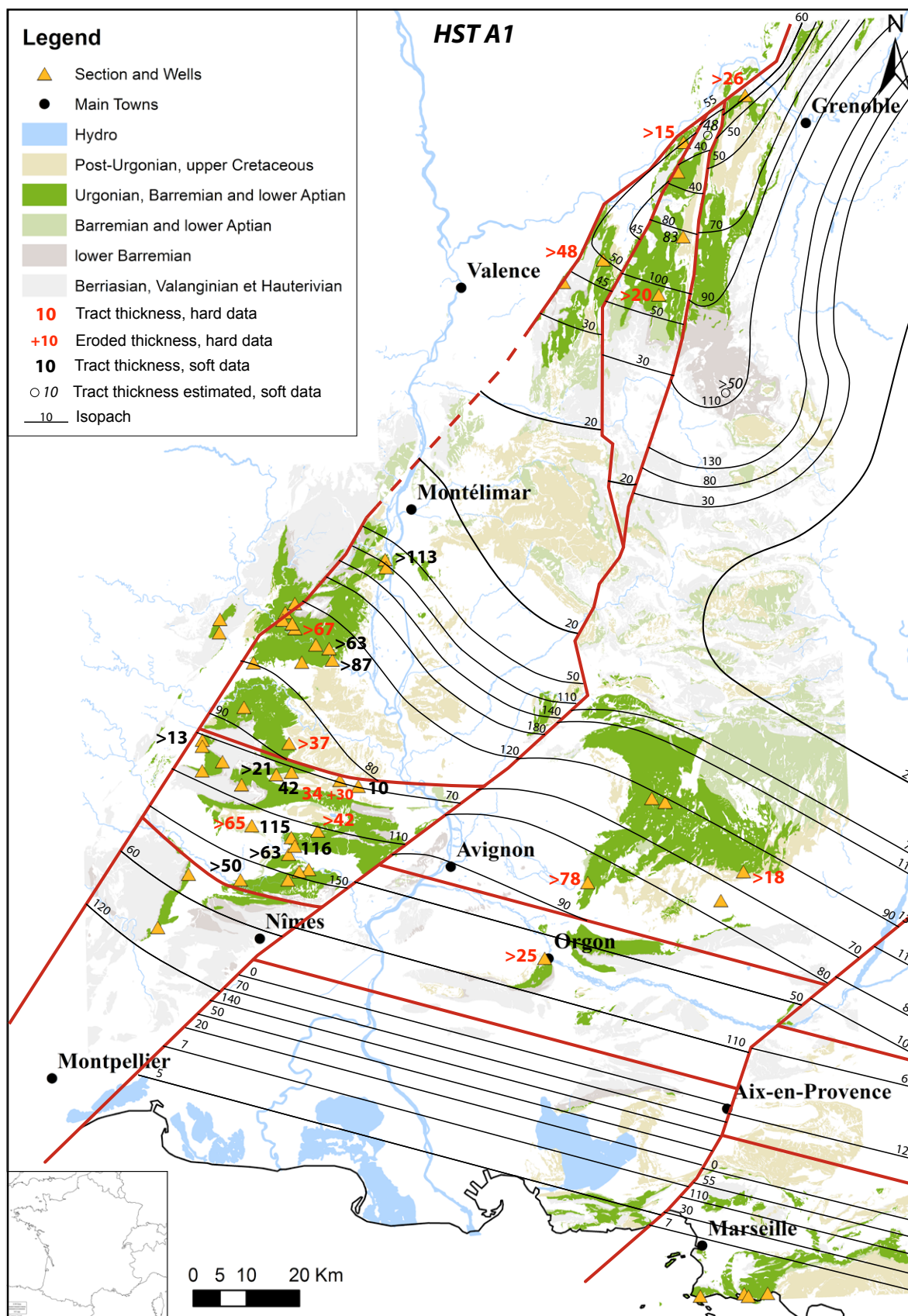


Annexe 70 : Carte d'épaisseur du cortège de bas niveau de la séquence A1.

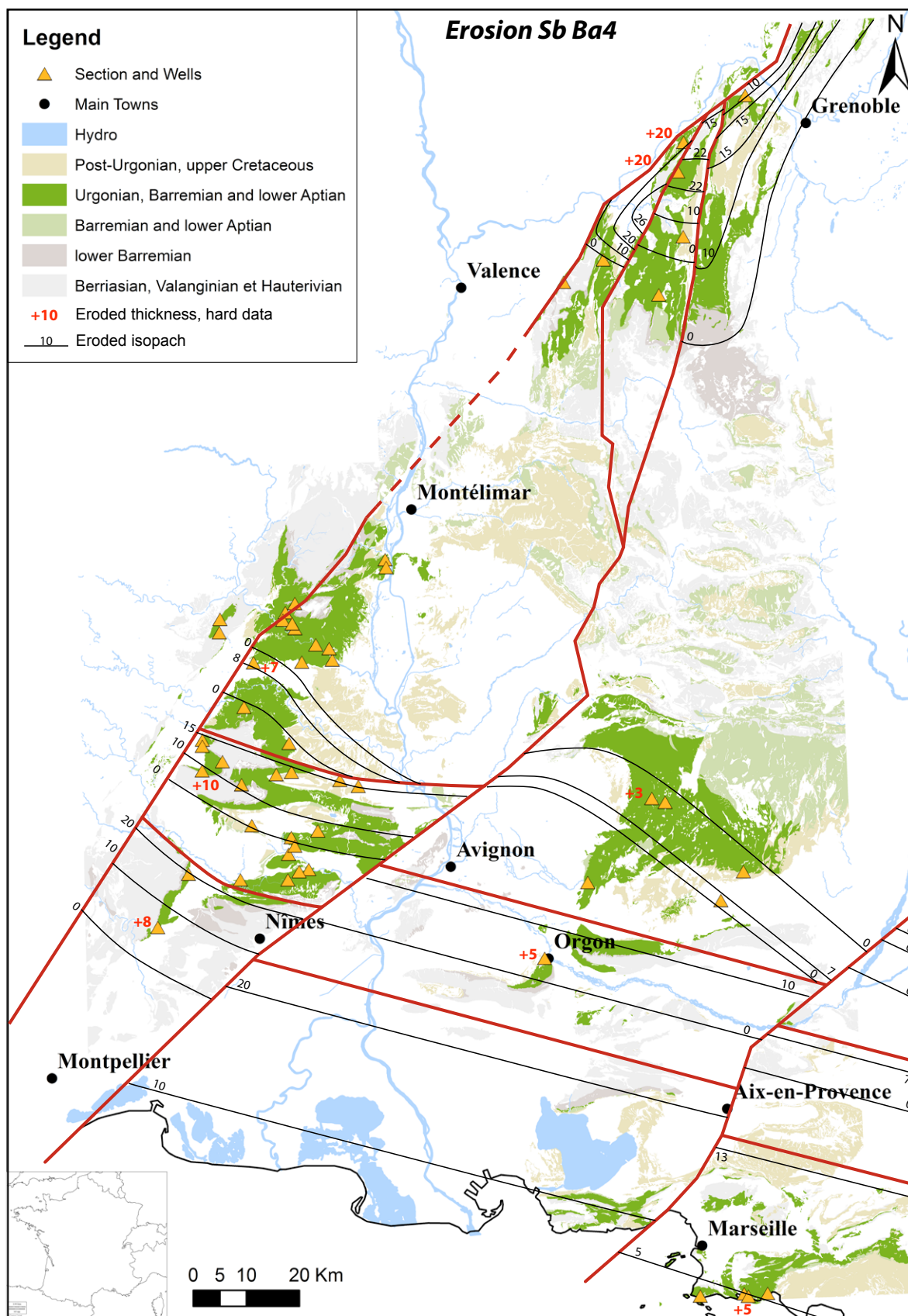


Annexe 71 : Carte d'épaisseur du cortège transgressif de la séquence A1.



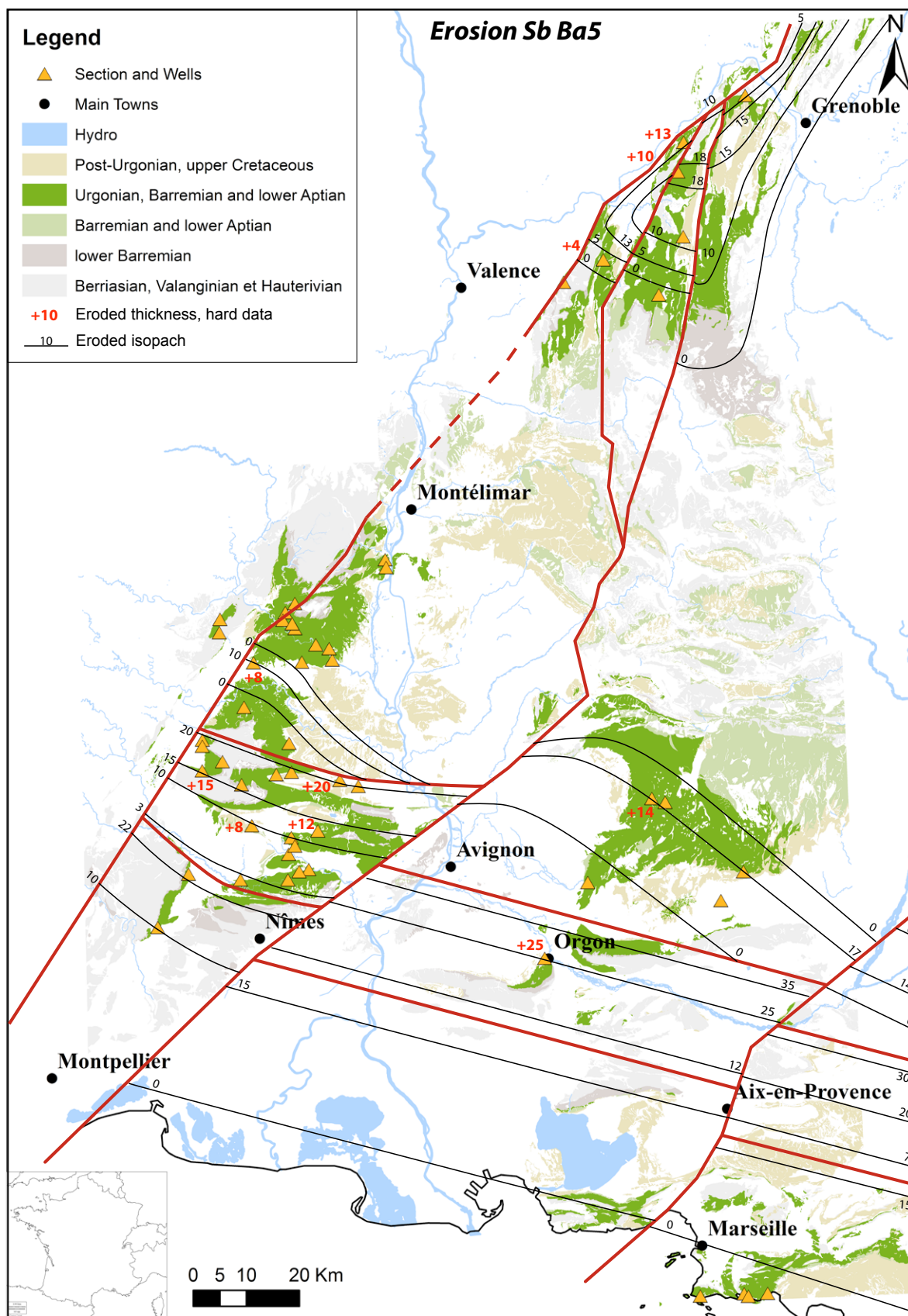


Annexe 72 : Carte d'épaisseur du cortège de haut niveau de la séquence A1.

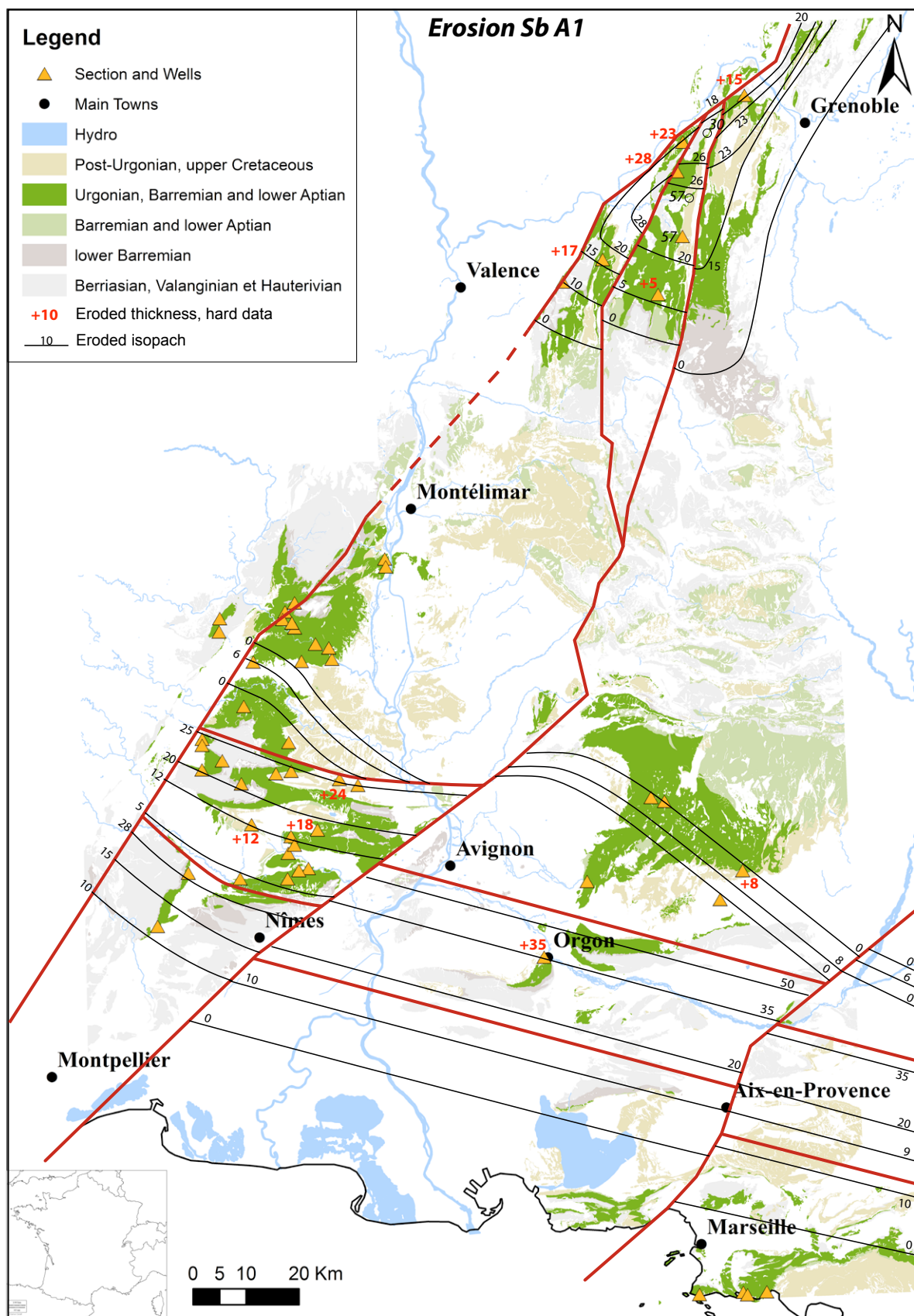


Annexe 73 : Carte des épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence Ba3 érodés au niveau de la limite de la séquence Ba4.

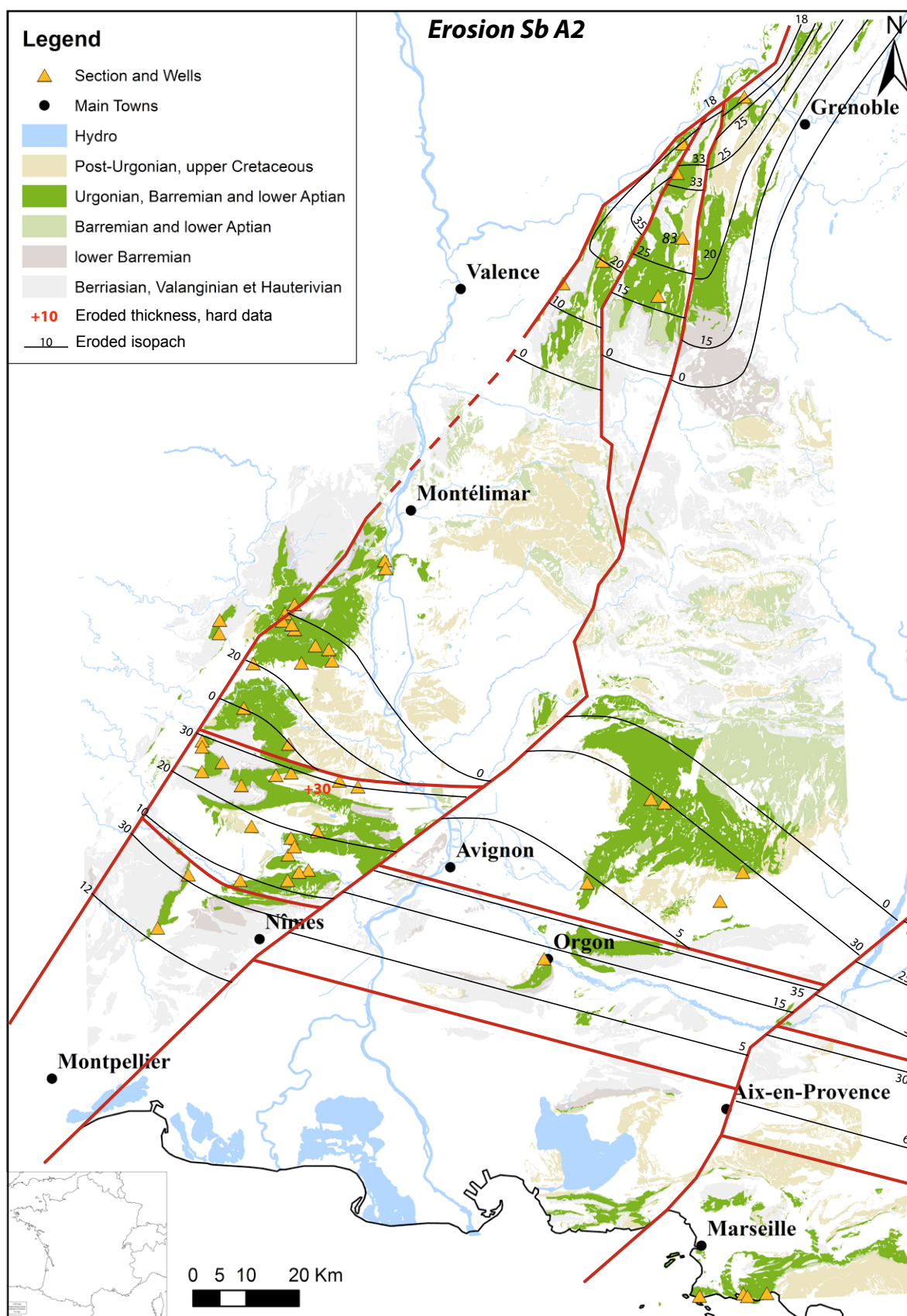




Annexe 74 : Carte des épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence Ba4 érodés au niveau de la limite de la séquence Ba5.

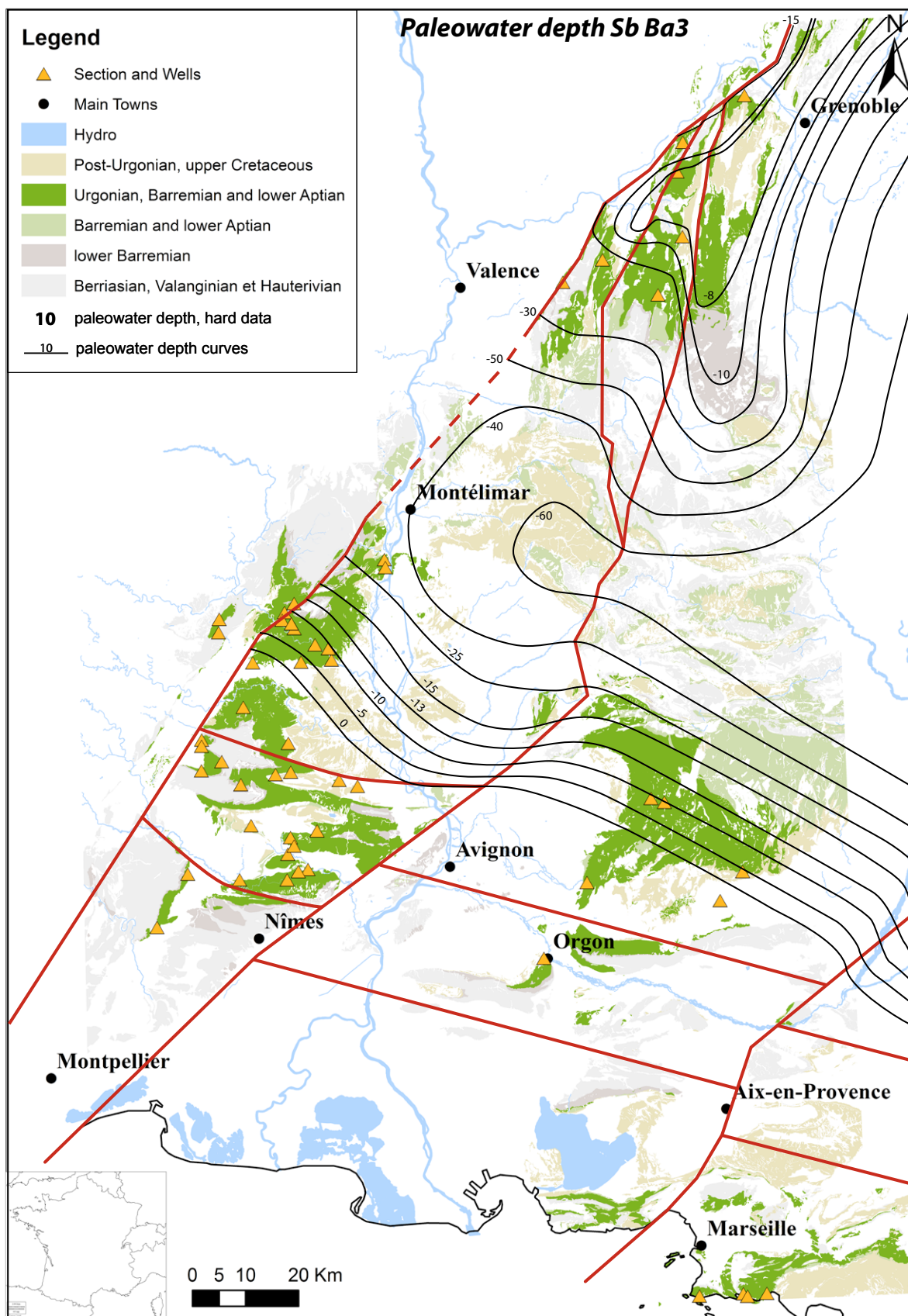


Annexe 75 : Carte des épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence Ba5 érodés au niveau de la limite de la séquence A1.

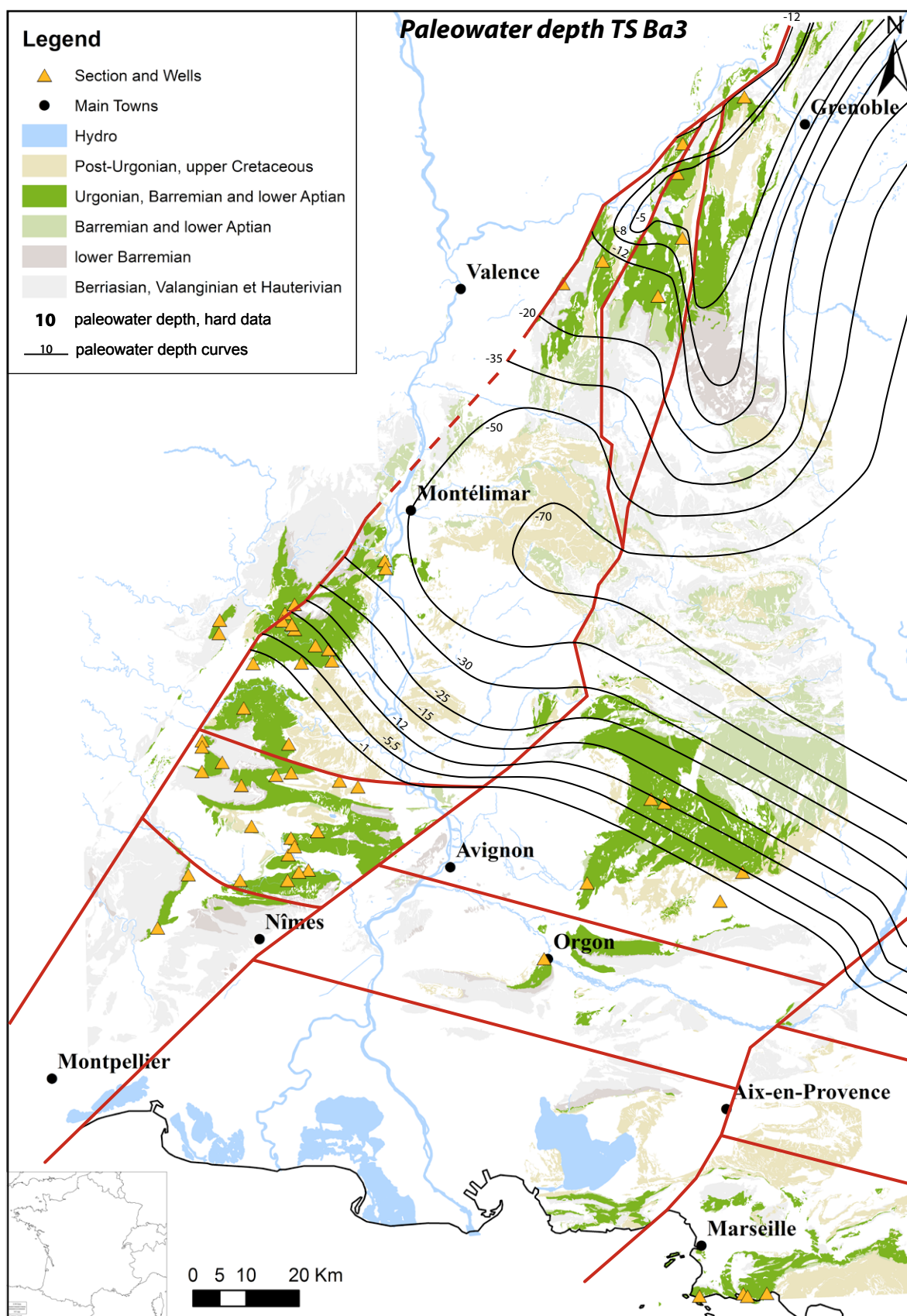


Annexe 76 : Carte des épaisseurs du cortège de haut niveau de la séquence A1 érodés au niveau de la limite de séquence A2.



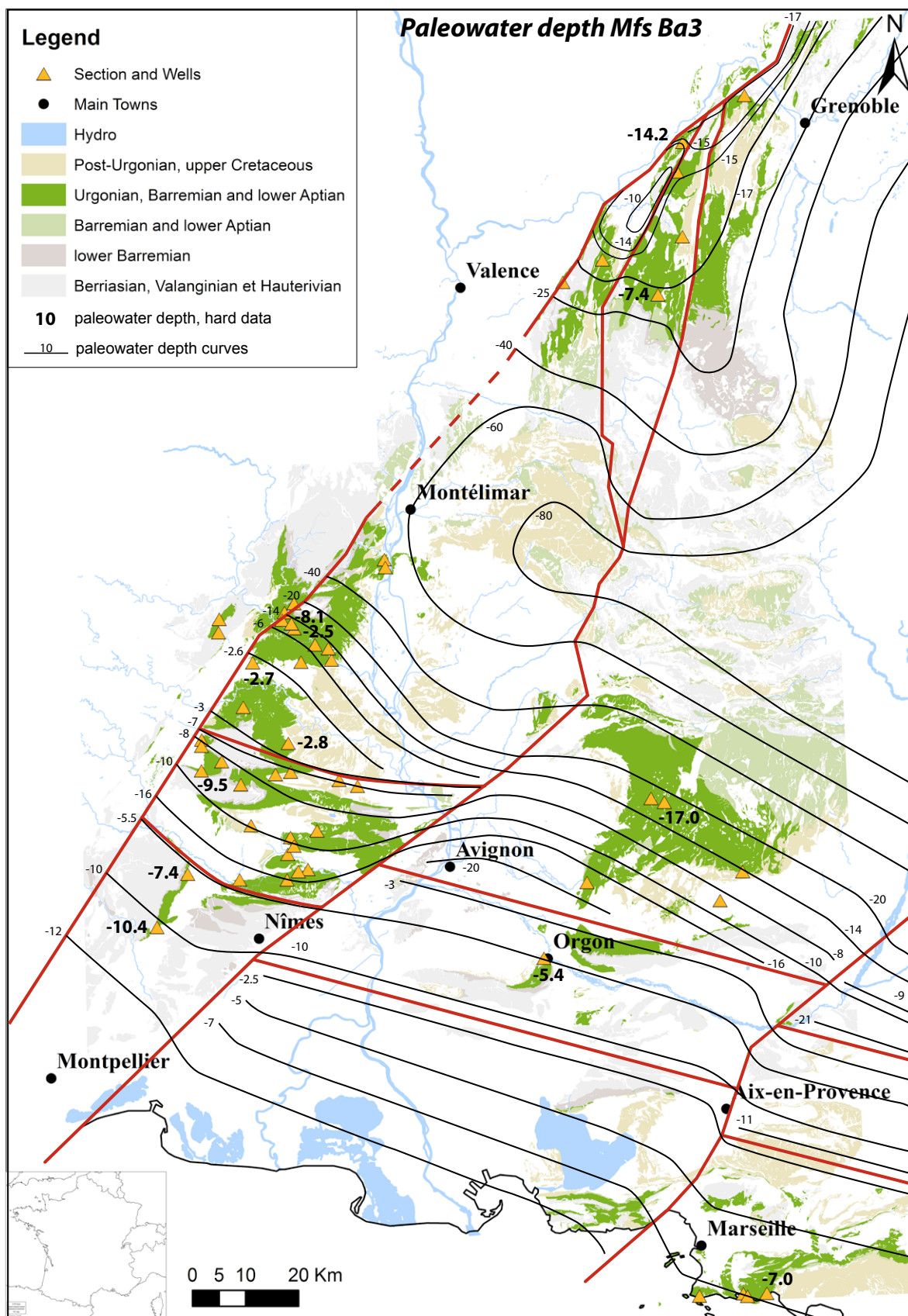


Annexe 77 : Carte de paléoprofondeur d'eau à la base de la séquence Ba3.



Annexe 78 : Carte de paléoprofondeur d'eau au niveau de la surface transgressive de la séquence Ba3.

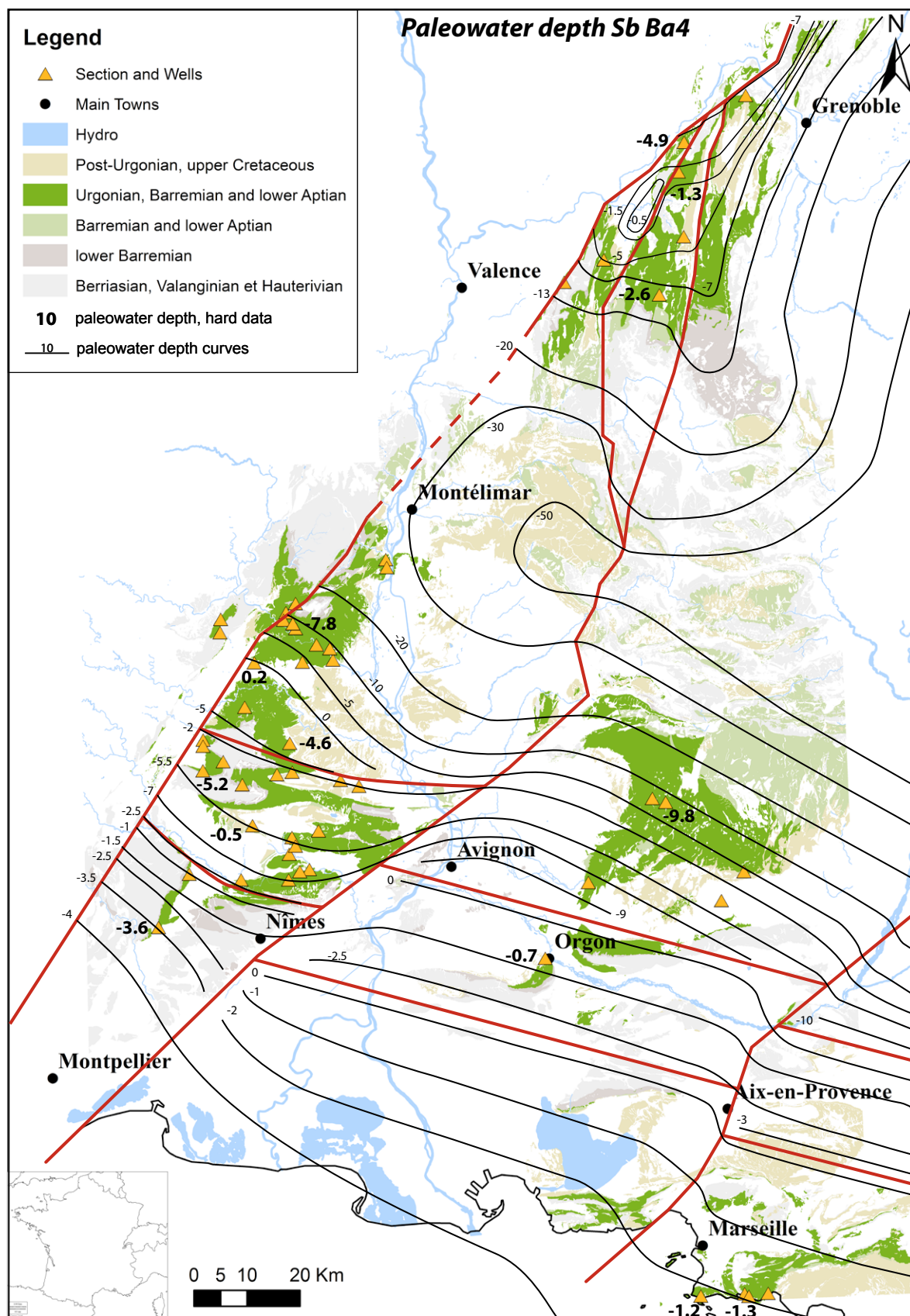




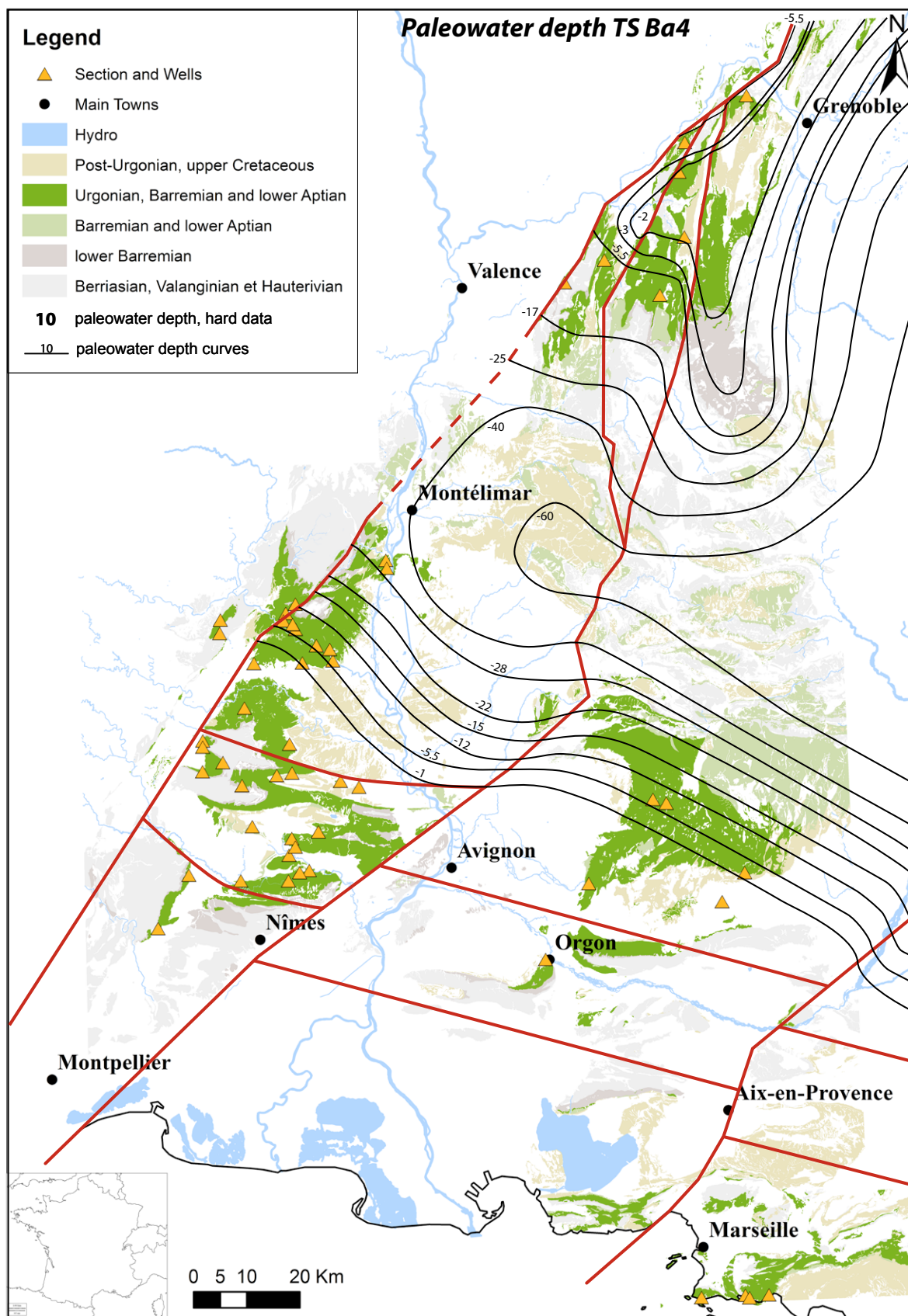
Annexe 79 : Carte de paléoprosfondeur d'eau au niveau la surface d'inondation maximum de la séquence

Ba3.



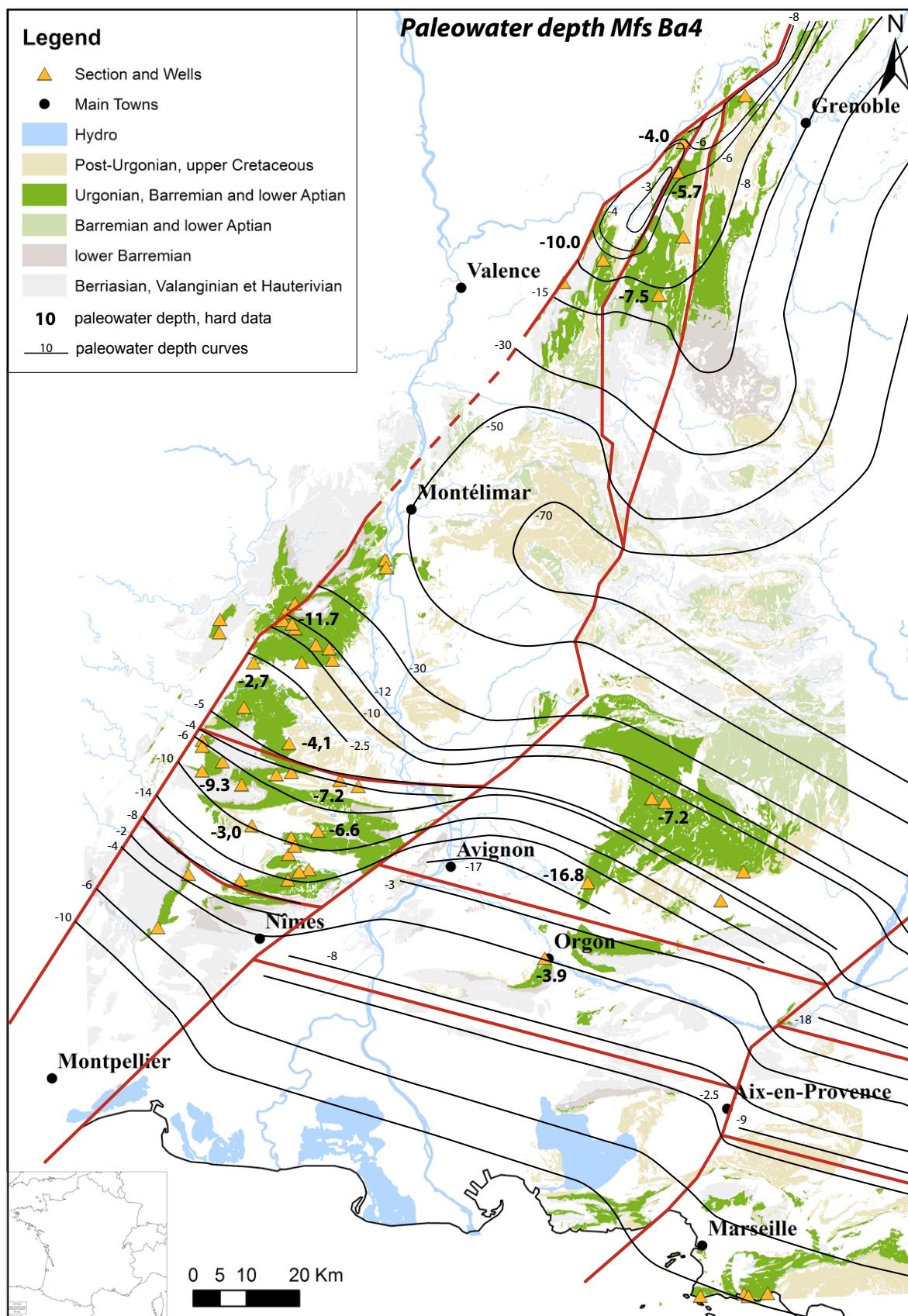


Annexe 80 : Carte de paléoprofondeur d'eau au sommet de la séquence Ba3, au niveau de la limite de séquence Ba4.

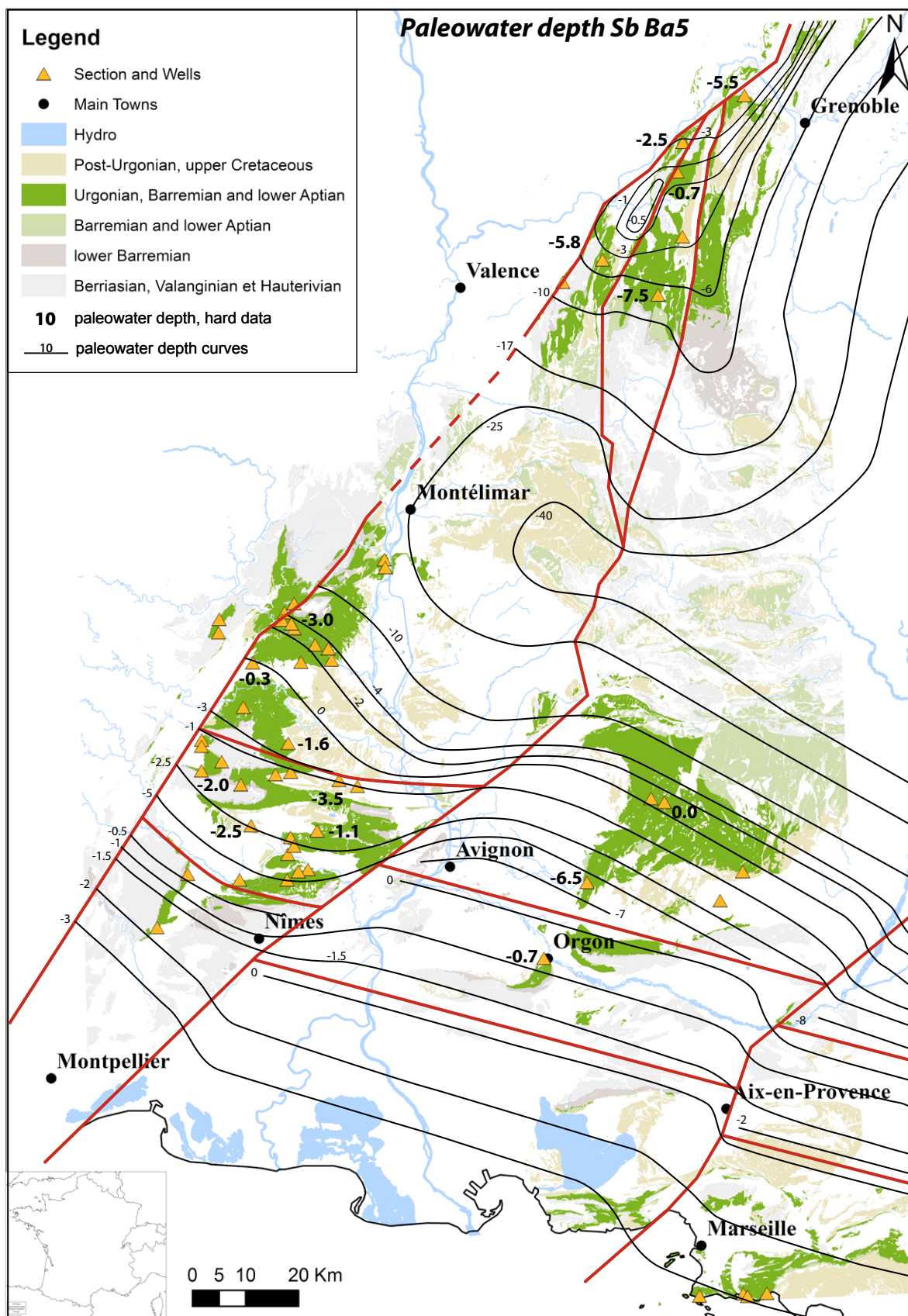


Annexe 81 : Carte de paléoprophondeur d'eau au niveau de la surface transgressive de la séquence Ba4.



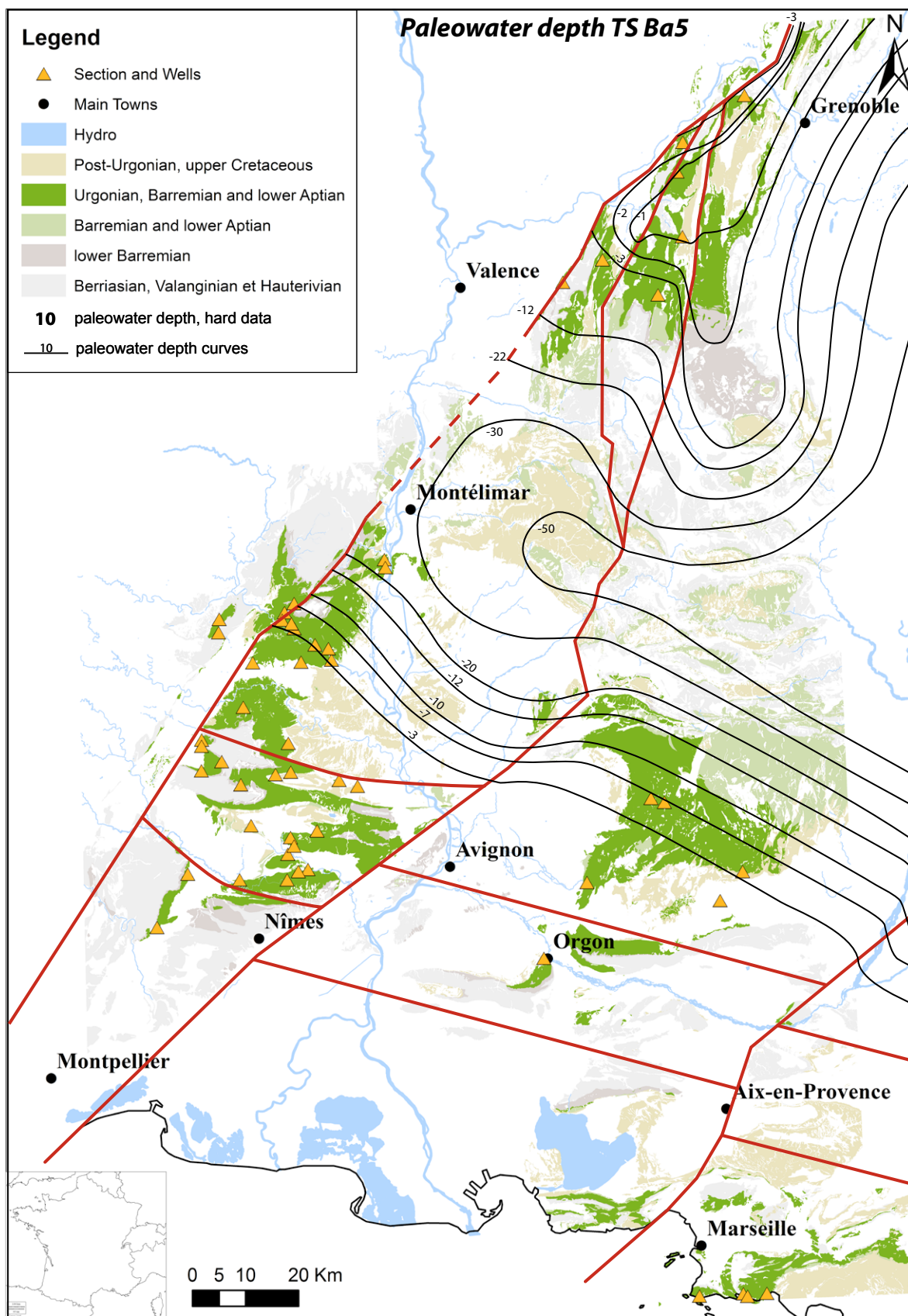


Annexe 82 : Carte de paléoprofondeur d'eau au niveau de la surface d'inondation maximum de la sé-  
quence Ba4.



Annexe 83 : Carte de paléoprofondeur d'eau au sommet de la séquence Ba4, au niveau de la limite de séquence Ba5.

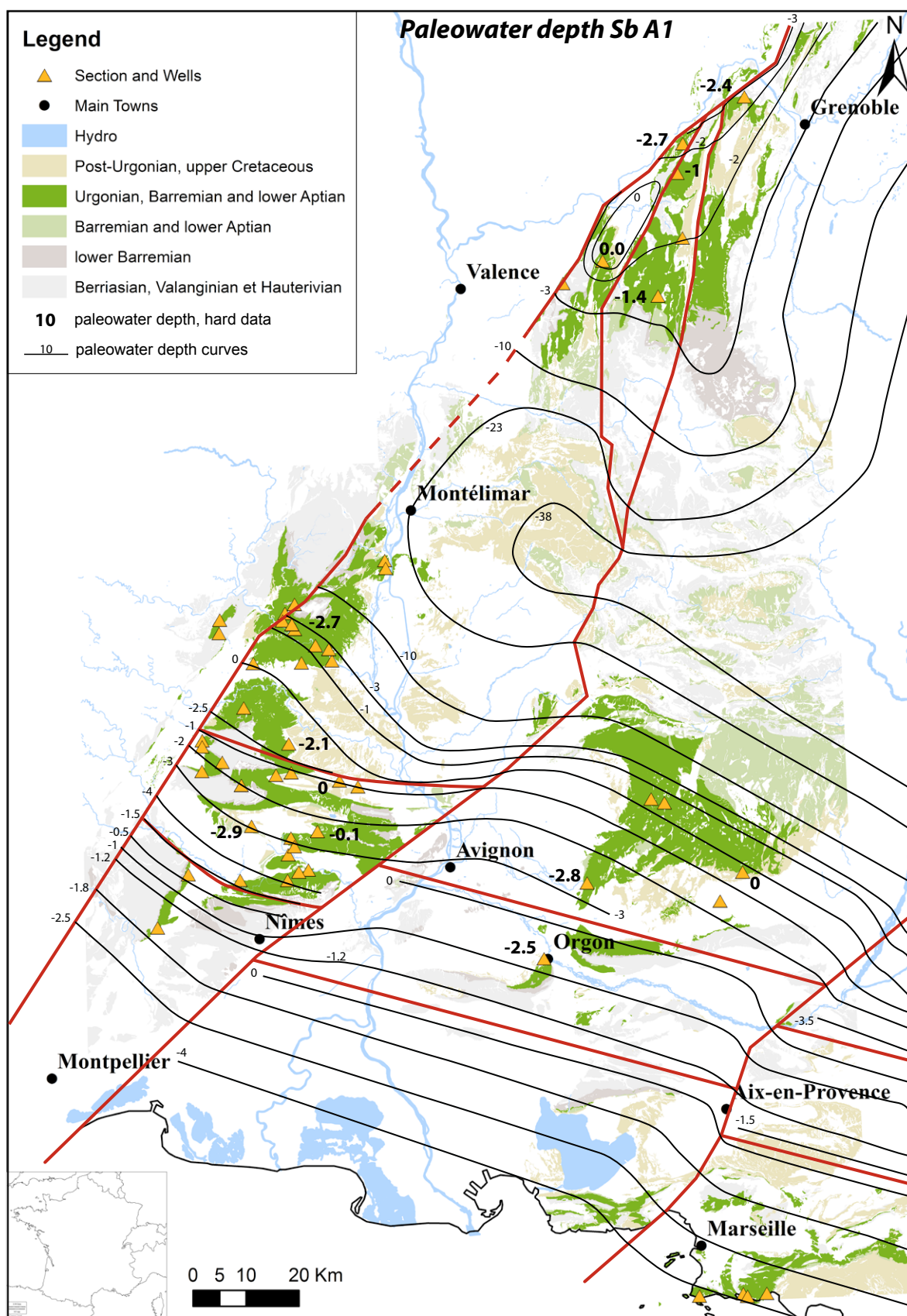




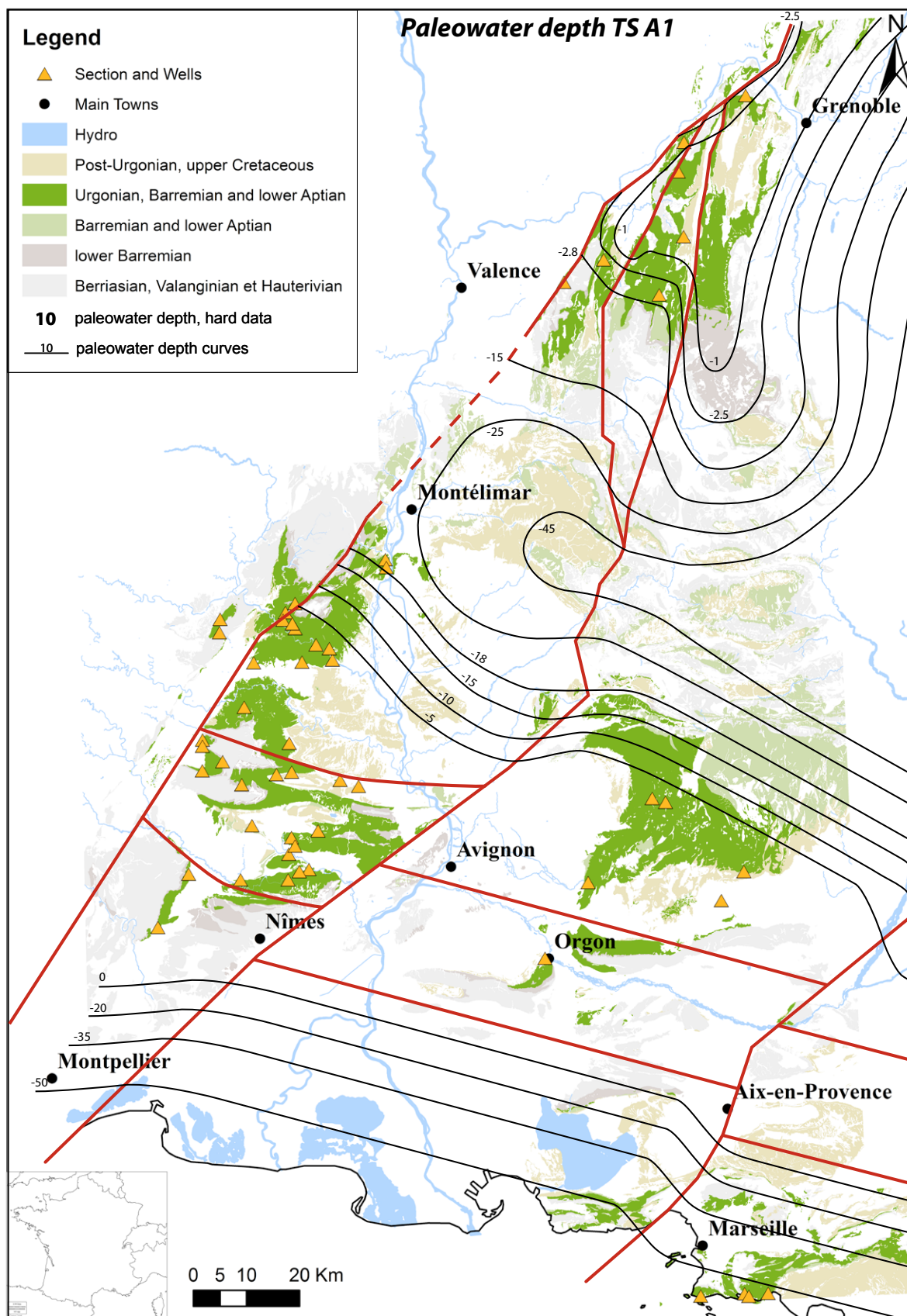
Annexe 84 : Carte de paléoprofondeur d'eau au niveau de la surface transgressive de la séquence Ba5.





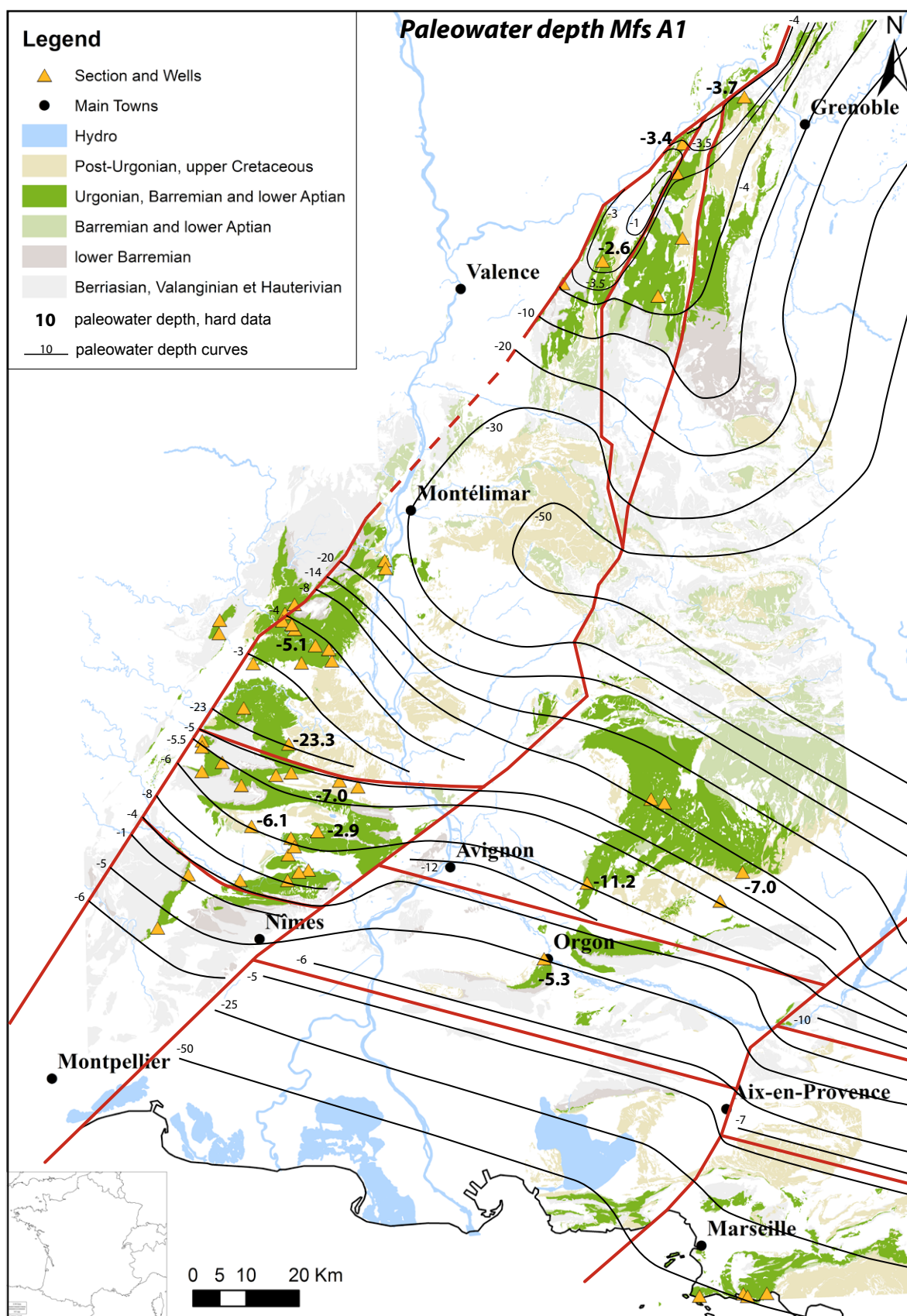


Annexe 86 : Carte de paléoprophondeur d'eau au sommet de la séquence Ba5, au niveau de la limite de la séquence A1.

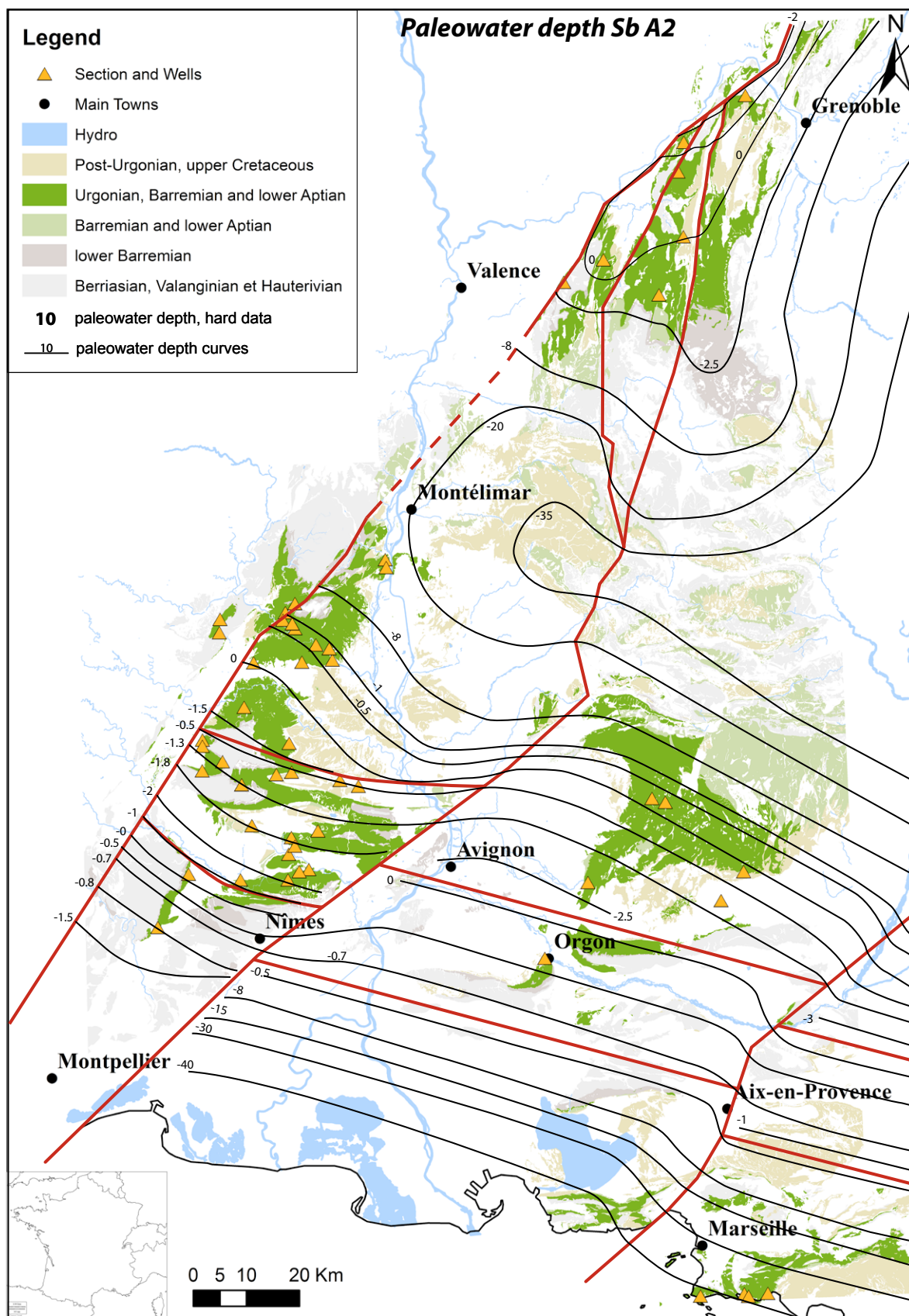


Annexe 87 : Carte de paléoprophondeur d'eau au niveau de la surface transgressive de la séquence A1.





Annexe 88 : Carte de paléopropondeur d'eau au niveau de la surface d'inondation maximum de la sé-  
quence A1.



Annexe 89 : Carte de paléoprophondeur d'eau au sommet de la séquence A1, au niveau de la limite de séquence A2.

### 3 RÉSUMÉS POUR DES PARTICIPATIONS AUX CONGRÈS

#### 3.1 GFC - 5ÈME RÉUNION THÉMATIQUE – PARIS 2009

**De la plate-forme urgonienne subalpine au bassin vocontien (France SE) :  
corrélations et conséquences biostratigraphiques**

**Urgonian Carbonate Platform-to-Vocontian Basin correlation (France SE)  
by means of biostratigraphy: an example from the Vercors and the Gard  
(Cretaceous, SE France)**

Hubert ARNAUD<sup>1</sup>, Annie ARNAUD-VANNEAU<sup>1</sup>, Fanny BASTIDE<sup>2</sup>,  
Gérard MASSONNAT<sup>2</sup>, Jean VERMEULEN<sup>3</sup>, Aurélien VIRGONE<sup>2</sup>

1 : Association Dolomieu, 18 boulevard Maréchal Leclerc, F-38000 Grenoble (France).

2 : TOTAL SA, CSTJF, avenue Larribau, 64018 Pau cedex.

3 : Grand'rue, 04330 Barrême.

**Key words:** Urgonian platform, Vercors, Gard, Barremian, Early Aptian

**Mots clefs :** Plate-forme urgonienne, Vercors, Gard, Barrémien, Aptien inférieur.

De tous les massifs subalpins septentrionaux, le Vercors est le seul qui offre des conditions d'affleurement ayant permis d'établir depuis trois décennies d'excellentes corrélations entre la plate-forme urgonienne et le bassin vocontien.

Les faciès hémipélagiques de la bordure nord du bassin vocontien ont été datés par des ammonites, notamment au voisinage des surfaces d'inondation maximales (maximum flooding sur-faces = mfs). Certains de ces niveaux sont intercalés dans les faciès carbonatés de la bordure de la plate-forme urgonienne. Cette disposition très favorable permet de reconnaître niveau par niveau – et sans ambiguïté – la répartition strati-graphique des organismes, en particulier les fora-minifères benthiques qui peuplaient les milieux peu profonds de cette plate-forme au Barrémien et à l'Aptien inférieur.

Au sud du Vercors, la présence d'un intervalle transgressif majeur, dont la mfs (marnes de Font Froide) est située dans la zone à *Gerhardtia sartousiana* de la partie médiane du Barrémien supérieur, permet de subdiviser les carbonates de la plate-forme urgonienne subalpine en deux ensembles lithologiques : à la base la Formation des Calcaires de Glandasse et, au au-dessus, la Formation des Calcaires urgoniens qui correspond à une sédimentation dans des milieux oligo-trophiques moins riches en nutriments que ceux du Barrémien inférieur. Alors

que la première est pour l'essentiel d'âge barrémien inférieur, la seconde a été datée ou attribuée au Barrémien supérieur-Aptien inférieur.

Plus au nord, l'analyse détaillée des coupes et de la falaise urgonienne qui se suit presque en continuité sur une centaine de kilomètres avait permis, en l'absence de niveau à ammonites, de dater du Barrémien supérieur-Aptien basal la Formation des Calcaires urgoniens du Vercors septentrional et des massifs subalpins situés plus au nord. Cette datation pouvait être contestée jusqu'à une date récente car elle était fondée d'une part sur l'interprétation séquentielle et, d'autre part, sur la répartition des orbitolinidés connus dans les séries datées par ammonites du Vercors méridional et du Diois. Elle est depuis peu confirmée grâce à l'étude des calcaires urgoniens du Gard.

Dans cette région en effet, la Formation des Calcaires urgoniens débute sans transition sur des marnes (marnes de Seynes) dont la partie sommitale a été datée par ammonites du sommet du Barrémien inférieur (zone à *Coronites darsi* de Vermeulen). Au-dessus, la succession verticale des Orbitolinidés des Calcaires urgoniens du Gard s'avère être identique à celle définie depuis longtemps dans l'ensemble des massifs subalpins septentrionaux.

Sur un autre plan, les corrélations établies, non seulement à l'échelle de la séquence de dépôt mais aussi, dans certains cas, à celle de la para-séquence, permettent de mieux connaître l'organisation géométrique des dépôts, d'où une meilleure approche de la paléogéographie de la plate-forme et de son évolution.

Enfin, les corrélations plate-forme-bassin proposées pour l'intervalle Barrémien-Aptien inférieur et les études géochimiques en cours aideront à l'amélioration des connaissances sur les changements climatiques à cette époque.



**BARREMIAN-LOWER APTIAN ZONATION OF LARGE BENTHIC FORAMINIFERA FROM THE URGONIAN PLATFORM OF SOUTHEASTERN FRANCE (VERCORS, ARDÈCHE, GARD)**

**Fanny Bastide**, Université de Grenoble and TOTAL, France,

**Annie Arnaud**, Vanneau Université de Grenoble and Associatiion Dolomieu, France

**Lucie Bonvallet**, Université de Grenoble and TOTAL, France

The Urgonian carbonate platform surrounding the French Vocontian basin is one of the best exposed carbonate platforms on the planet. The Urgonian limestones were deposited on a shelf-type platform, which developed between the lower Barremian and lower Aptian on the continental margin of Northern Tethys. The Urgonian platform is divided into two formations and is composed of 7 depositional sequences, from BA1 to AP2. The lower Barremian Bioclastic Limestone Formation developed on the platform margin (BA1 and BA2 depositional sequences and BA3 lowstand systems tract); the upper Barremian-lower Aptian Urgonian Limestone Formation developed in an inner-platform setting and is composed of rudistid facies. The Urgonian Limestone Formation can be further subdivided into four members: (i) the lower Urgonian Limestone Member (BA3 transgressive and highstand systems tract, BA4 and BA5 depositional sequences); (ii) the lower Orbitolina Marl Member (AP1 transgressive systems tract), the first step of the Aptian transgression; (iii) the upper Urgonian Limestone Member consisting of inner-platform rudistid and coral facies (AP1 highstand systems tract); and (iv) the upper Orbitolina Marl Member (AP2 depositional sequence), which corresponds to the OAE1a Oceanic Anoxic Event.

The basal lower Barremian Bioclastic Limestone Formation (BA1 and BA2 depositional sequences and BA3 lowstand prograding wedge) corresponds to a narrow fringing platform and is characterized by the assemblage of small high conical orbitolinids (*Paleodictyoconus cuvillieri*, *Urgonina alpillensis*, *Cribellopsis thieuloyi*, *Orbitolinopsis debelmasi* ...). The depositional sequence BA3 (transgressive and highstand systems tracts) shows the occurrence of flat orbitolinids such as *Praedictyorbitolina carthusiana*, *Eopalorbitolina* and the first appearance of *Palorbitolina*. The depositional sequences BA4 and BA5 are characterized by various *Paracoskinolina* (*P. sunnilandensis*, *P. maynci*, *P. hispanica*, *P. reicheli*) and *Neotrocholina friburgensis*; high conical forms and flattened forms are thus found together. The depositional sequences AP1 is characterized by the abundance of *Palorbitolina lenticularis* (*Orbitolina marl*) and of *Orbitolinopsis* (*kiliani*, *cuvillieri*, *buccifer*, *pygmaea*), as well as the

disappearance of large sized *Neotrocholina*. The highstand of this sequence is marked by the occurrence of a new foraminifer: *Massonnatiella*. AP2, the last depositional sequence, is dominated by *Palorbitolina lenticularis* with an arenaceous test.

### 3.3 IAS 2011, MEETING OF SEDIMENTOLOGISTS, ZARAGOZA, SPAIN

#### **A sequence stratigraphic framework and an age model for the Urgonian in southeastern France (Gard and Ardeche). Evidence from new biostratigraphic data and benthic foraminiferal assemblages.**

F. Bastide<sup>1, 2&4</sup>, Annie Arnaud-Vanneau<sup>1&3</sup>, Gérard Massonnat<sup>4</sup>, Aurélien Virgone<sup>4</sup>,

Karl B. Föllmi<sup>2</sup>, Thierry Adatte<sup>2</sup>, Hubert Arnaud<sup>3</sup>

1: LGCA, Université Joseph Fourier, 38041 Grenoble, France, (annie.arnaud@ujf-grenoble.fr)

2: Institut de Géologie et Paléontologie, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse, (karl.foellmi@unil.ch, thierry.adatte@unil.ch)

3: Association Dolomieu, 38031 Grenoble, France (annie.arnaud@orange.fr, hubert\_arnaud@orange.fr)

4: TOTAL S.A., 64000 Pau, France (fanny.bastide@total.com, gerard.massonnat@total.com, aurelien.virgone@total.com)

Urgonian platform carbonates are widespread in the SE France. They were deposited along the northern Tethyan margin, on the Vocontian basin margin and are mostly composed of rudist facies and bioclastic/ooid grainstones. The Urgonian formation in SE France has been studied by various authors since 1847. In spite of this, correlation between sections and interpretation of the depositional sequences are still a very controversial matter.

An extensive study was performed on Urgonian outcrops in the Gard and Ardèche areas. The results of the analysis of benthic faunal assemblages (focused on Orbitolinidae) allow for the distinction of each systems tract within five depositional sequences (from the Late Barremian sequence Ba3 up to the Early Aptian sequence Ap2).

Urgonian carbonates often appear in cliffs rendering difficult the collection of complete sections at single locations. Until now, only partial sections along roads or paths were available for geologists. For this study, sections have been examined, documented and sampled either by abseiling across up to 250 meters high cliffs which were hitherto not studied by geologists or by drilling dedicated wells through the entire series.

The following species distribution is based on the study of 2156 thin sections acquired



through sampling of complete series:

- TST and HST Ba3: They are characterized by *Praedictyorbitolina carthusiana*, *Eopalorbitolina charollaisi* and *Orbitolinopsis debelmasi*. Primitive forms of *Paracoskinolina reicheli* and *Palorbitolina lenticularis* have been identified.

- TST and HST Ba4: The typical species of Ba3 have disappeared. In the same time, most *Paracoskinolina* species (*P. sunnilandensis*, *P. maynci*, *P. reicheli* and *P. hispanica*) appear. They become larger in sequence Ba5.

- TST and HST Ba5: They are characterized by an abundance of the high conical and the largest forms of *Neotrocholina friburgensis* and by the degree of evolution of *Paracoskinolina*. Moreover, several *Orbitolinopsis* occur during the HST: *O. buccifer*, *O. pygmea*, *O. kiliani* and *O. briacensis*. Scarcely observed in sequence Ba5, these forms become more evolved and abundant in Ap1.

- TST and HST Ap1: They are easily identified by the total disappearance of large-sized *Neotrocholina* and by the abundance of *Orbitolinopsis*. *Palorbitolina lenticularis* becomes more and more frequent in the TST of sequence Ap1 until its MFS (known as “Lower Orbitolina Marl Member”) while the occurrence of a new genus (*Massonnatiella*) help to distinguish the HST.

- TST and HST Ap2: They are dominated by the abundance of *Palorbitolina lenticularis* with an arenaceous test.

This species distribution is for the moment only validated for Gard and Ardeche areas and consistent with the species distribution described by A.Arnaud in Vercors. New sections from studies of other sectors around the Vocontian basin (Vercors, Mont de Vaucluse, Provence) will be integrated to improve and extend this biostratigraphic tool to the whole of SE France.

**3.4 GEO 2012, THE 10<sup>TH</sup> MIDDLE-EAST GEOSCIENCES  
CONFERENCE, MANAMA, BAHREIN**

**An Outcrop Analog of Kharaib & Shu'aiba Reservoir: Example of the  
Urgonian Platform (Gard and Ardèche, SE France)**

F. Bastide, G. Massonnat, A. Virgone, C. Pabian-Goyheneche

Urgonian platform carbonates are widespread in the SE France. They were deposited along the northern Tethyan margin during the lower cretaceous, on the Vocontian basin margin and are mostly composed of rudist facies and bioclastic/ooid grainstones. The Urgonian formation of southeastern France is a reservoir analogue of the Shu'aiba and Kharaib Formations of the Middle East and constitutes a good reference proxy to illustrate and understand the internal geometries of these reservoirs.

Total has elaborated a work program focused on the appraisal of geometric and petrophysical heterogeneities in the Barremo-Aptian carbonate reservoirs, located in the South-East of France. This work program has integrated multi-scales static and dynamic data as: outcrop studies (facies, fractures, fauna, ...), well drilling, electrical and PLT logging, wells tests, aerial photographs, springs and aquifer survey through a multidisciplinary method: sedimentology, hydrogeology and structural geology.

A huge database was constituted, including several key sections (i.e. Mont Bouquet, Angostrines, Serre de Tourre, Rouvière,) and more than 60 vertical wells drilled in the Urgonian aquifer. This static database was completed by several dynamical data including 40 well tests and survey of 13 springs during one year.

Three sequences have therefore been described in the Upper Barremian (Ba3, Ba4 and Ba5) and two sequences in the Lower Aptian (A1 and A2). Complementary analysis were performed on several wells (Les Plans, Lembarnes, Le Blanquau, Serviers, Flaux, Collias, ...) in order to constrain the correlation between the references sections and to define geometries of sedimentary bodies.

As a conclusion, a geological model for the Urgonian platform of Gard and Ardeche sectors has been built thanks to an integrated workflow using a mixed static and dynamic approach in order to constrain the reservoir architecture. The impact of the structural framework has been evidenced by the model and, finally, impact of early or late heterogeneity has been weighted through fluid flow simulation honoring hydrolic dynamic data.

### 3.5 SWISSSED, 20<sup>TH</sup> MEETING, FRIBOURG, SUISSE

#### **A new benthic foraminiferal biostratigraphic framework for the Urgonian of southeastern France.**

F. Bastide<sup>1, 2&4</sup>, Annie Arnaud-Vanneau<sup>1&3</sup>, Karl B. Föllmi<sup>2</sup>, Thierry Adatte<sup>2</sup>,

Gérard Massonnat<sup>4</sup>, Aurélien Virgone<sup>4</sup>, Hubert Arnaud<sup>3</sup>

1: ISTerre, Université Joseph Fourier, 38041 Grenoble, France,

2: Institut de Géologie et Paléontologie, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse, (karl.foellmi@unil.ch, thierry.adatte@unil.ch)

3: Association Dolomieu, 38031 Grenoble, France (annie.arnaud@orange.fr, hubert\_arnaud@orange.fr)

4: TOTAL S.A., 64000 Pau, France (fanny.bastide@total.com, gerard.massonnat@total.com, aurelien.virgone@total.com)

Urgonian platform carbonates are widespread in southeastern France. They were deposited along the northern Tethyan margin, on the margin of the Vocontian basin and are mostly composed of rudist wackestone and bioclastic/ooid grainstone. The fauna of the Urgonian formation in southeastern France has been studied by various authors since 1847 (A. Orbigny, A. Arnaud-Vanneau, H. Arnaud, J. Charollais, B. Clavel, W. Kilian, J.P. Masse, R. Schroeder...). The goal of this project is to complement existing observations and produce a synthesis of the development of the Urgonian platform for the whole southeastern sector of France.

As part of this project, an extensive study was performed on Urgonian outcrops in the Gard and Ardèche areas. The results of the analysis of benthic faunal assemblages (focused on Orbitolinidae) allow for the distinction of each systems tract within five depositional sequences (from the Late Barremian sequence Ba3 up to the Early Aptian sequence Ap2).

Urgonian carbonates often appear in cliffs rendering difficult the collection of complete sections at single locations. Until now, only partial sections along roads or paths were available for geologists. For this study, sections have been examined, documented and sampled either by abseiling across up to 250 meters high cliffs which were hitherto not studied by geologists or by drilling dedicated wells through the entire series.

The following species distribution is based on the study of 2156 thin sections acquired through sampling of complete series:

–TST and HST Ba3 (early late Barremian): They are characterized by *Praedictyorbitolina carthusiana*, *Eopalarbitolina charollaisi* and *Orbitolinopsis debelmasi*. Primitive forms of *Paracoskinolina reicheli* and *Palorbitolina lenticularis* have been identified.

–TST and HST Ba4 (middle late Barremian): The typical species of Ba3 have disappeared. In the same time interval, most *Paracoskinolina* species (*P. sunnilandensis*, *P. maynci*, *P. reicheli* and *P. hispanica*) appear. They become larger in sequence Ba5.

–TST and HST Ba5 (late late Barremian): They are characterized by an abundance of the high conical and the largest forms of *Neotrocholina friburgensis* and by the degree of evolution of *Paracoskinolina*. Moreover, several *Orbitolinopsis* occur during the HST: *O. buccifer*, *O. pygmea*, *O. kiliani* and *O. briacensis*. Scarcely observed in sequence Ba5, these forms become more evolved and abundant in Ap1.

–TST and HST Ap1 (earliest Aptian): They are easily identified by the total disappearance of large-sized *Neotrocholina* and by the abundance of *Orbitolinopsis*. *Palorbitolina lenticularis* becomes more and more frequent in the TST of sequence Ap1 until its MFS (known as “Lower Orbitolina Marl Member”) while the occurrence of a new genus (*Massonnatiella*) helps to distinguish the HST.

–TST and HST Ap2: They are dominated by the abundance of *Palorbitolina lenticularis* with an arenaceous test.

The here-identified benthic foraminiferal assemblages and their associated systems tracks and sequences of the Urgonian Formation are so far only validated for sections in the Gard and Ardeche departments. Other segments on the border of the Vocontian basin (Provence, Monts de Vaucluse, Vercors) are presently analyzed and the data obtained will probably improve this biostratigraphy tool.

## REFERENCES

- ORBIGNY A. (1847-1849)-Paléontologie française. Terrain crétacés IV. Masson ed. Paris
- ARNAUD-VANNEAU A. (1980).- Micropaléontologie, paléoécologie et sédimentologie d'une plate-forme carbonatée de la marge passive de la Téthys : l'Urgonien du Vercors septentrional et de la Chartreuse (Alpes occidentales).- Thèse, Grenoble ; Géologie Alpine, Grenoble, Mém. H.S., n° 11, 874 p.
- ARNAUD H. (1981).- De la plate-forme urgonienne au bassin vocontien : le Barrémobédoulien des Alpes occidentales entre l'Isère et le Büech (Vercors méridional, Diois oriental et Dévoluy).- Thèse, Grenoble ; Géologie Alpine, Grenoble, Mém. H.S., n° 12, 3 vol., 804 p.
- MASSE J.-P. Les calcaires urgoniens de Provence Valangienien-Aptien inférieur. Thèse.

Marseille, Université Aix-Marseille II, 1976, 255.

- CHAROLLAIS J., CLAVEL B., SCHROEDER R., BUSNARDO R. & MASSE J.-P. (1998).- La plate-forme urgonienne. Un exemple de plate-forme carbonatée : biostratigraphie, stratigraphie séquentielle, sédimentologie, études régionales.- Publications du Département de Géologie et Paléontologie, Université de Genève, (Série «Guide géologique»), n° 8, 181 p.

- CLAVEL B., BUSNARDO R., CHAROLLAIS J., CONRAD M., GRANIER B. (2009).- Nouvelles données sur la répartition des Orbitolinidés à l'Hauterivien supérieur, au Barrémien et à l'Aptien inférieur dans le Sud Est de la France et le Jura Franco-Suisse. Arch. Sci (2009) 62 : 125-146.

### 3.6 EGU 2012, GENERAL ASSEMBLY, VIENNA, AUSTRIA

#### **Urgonian platform carbonates (Barremian-Early Aptian) of southeastern France: description of a new project and first data**

F. Bastide<sup>1, 2&4</sup>, Gérard Massonnat<sup>4</sup>, Karl B. Föllmi<sup>2</sup>, Thierry Adatte<sup>2</sup>, Thierry Dumont<sup>1</sup>,

Annie Arnaud-Vanneau<sup>1&3</sup>, Aurélien Virgone<sup>4</sup>, Hubert Arnaud<sup>3</sup>

1: ISTerre, Université Joseph Fourier, 38041 Grenoble, France (Thierry.Dumont@ujf-grenoble.fr),

2: Institut de Géologie et Paléontologie, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse, (karl.foellmi@unil.ch, thierry.adatte@unil.ch)

3: Association Dolomieu, 38031 Grenoble, France (annie.arnaud@orange.fr, hubert\_arnaud@orange.fr)

4: TOTAL S.A., 64000 Pau, France (fanny.bastide@total.com, gerard.massonnat@total.com, aurelien.virgone@total.com)

Urgonian platform carbonates are widespread in southeastern France. They were deposited along the northern Tethyan margin and bordered the Vocontian basin. They are predominantly composed of rudistic wackestone and bioclastic/ooid grainstone.

The Urgonian Formation in southeastern France has been studied by various authors since 1847 (A. Orbigny, A. Arnaud-Vanneau, H. Arnaud, J. Charollais, B. Clavel, W. Kilian, J.P. Masse, R. Schroeder...). The goal of this project is to complement existing observations and produce a synthesis of the development of the Urgonian platform for the whole southeastern sector of France. This will be achieved by a sedimentological, palaeontological and stratigraphical study on 54 sections and dedicated wells, i.e., 2418 thin sections or 10.5 km of sections in total, through the entire Urgonian series, from the transgressive system track of Ba3 (early late Barremian) to the highstand system track of Ap2 (early Aptian). The sections and wells are located in five main sectors of southeastern France: Gard, Ardèche, Vercors, Vaucluse and Provence. A biostratigraphic chart relevant to all five sectors has been realized in order to correlate between the sections. In addition, the geochemistry (carbon and oxygen isotopes, whole-rock and clay mineralogies, and phosphorus contents) of five key sections (one in each main sector) has been analysed to evaluate palaeoenvironmental conditions and corroborate the stratigraphic correlation throughout southeastern France.

An additional study will be performed on the global and regional geotectonic constellation during the late Barremian and the early Aptian, and finally a numerical model will be developed based on the stratigraphic correlation between the sections and consistent with their palaeoenvironmental and paleoclimatic context.

With this interdisciplinary approach, we hope to be able to reconstruct and understand the development of the Urgonian platform in terms of its palaeoenvironment, palaeo-climate and palaeotectonic constellation and relate those different factors with the evolution of the platform morphology.

#### REFERENCES

- ORBIGNY A. (1847-1849)-Paléontologie française. Terrain crétacés IV. Masson ed. Paris
- ARNAUD-VANNEAU A. (1980).- Micropaléontologie, paléoécologie et sédimentologie d'une plate-forme carbonatée de la marge passive de la Téthys : l'Urgonien du Vercors septentrional et de la Chartreuse (Alpes occidentales).- Thèse, Grenoble ; Géologie Alpine, Grenoble, Mém. H.S., n° 11, 874 p.
- ARNAUD H. (1981).- De la plate-forme urgonienne au bassin vocontien : le Barrémobédoulien des Alpes occidentales entre l'Isère et le Büech (Vercors méridional, Diois oriental et Dévoluy).- Thèse, Grenoble ; Géologie Alpine, Grenoble, Mém. H.S., n° 12, 3 vol., 804 p.
- MASSE J.-P. Les calcaires urgoniens de Provence Valangienien-Aptien inférieur. Thèse. Marseille, Université Aix-Marseille II, 1976, 255.
- CHAROLLAIS J., CLAVEL B., SCHROEDER R., BUSNARDO R. & MASSE J.-P. (1998).- La plate-forme urgonienne. Un exemple de plate-forme carbonatée : biostratigraphie, stratigraphie séquentielle, sédimentologie, études régionales.- Publications du Département de Géologie et Paléontologie, Université de Genève, (Série «Guide géologique»), n° 8, 181 p.



### 3.7 ADIPEC 2012, ABU DHABI, UNITED ARABIAN EMIRATES



**SPE 162305162305**

## **An Outcrop Analog of Kharaib & Shu'aiba Reservoirs: the Urgonian Platform of Southeastern France (Gard and Ardèche).**

Fanny Bastide, Gérard Massonnat, Aurélien Virgone, Cécile Pabian-Goyheneche, TOTAL S.A.

Copyright 2012, Society of Petroleum Engineers

This paper was prepared for presentation at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference held in Abu Dhabi, UAE, 11–14 November 2012.

This paper was selected for presentation by an SPE program committee following review of information contained in an abstract submitted by the author(s). Contents of the paper have not been reviewed by the Society of Petroleum Engineers and are subject to correction by the author(s). The material does not necessarily reflect any position of the Society of Petroleum Engineers, its officers, or members. Electronic reproduction, distribution, or storage of any part of this paper without the written consent of the Society of Petroleum Engineers is prohibited. Permission to reproduce in print is restricted to an abstract of not more than 300 words; illustrations may not be copied. The abstract must contain conspicuous acknowledgment of SPE copyright.

---

### **Abstract**

The Barremo-Aptian Urgonian formation is widespread in southeastern France. This formation is a giant (20 000 km<sup>2</sup>) limestone platform deposited along the northern Tethyan margin during the lower Cretaceous, on the Vocontian basin margin. The Urgonian carbonates are mostly composed of rudist facies interrupted by several Orbitolinids-rich level. This formation has an equivalent in time in the Middle-East series: the Kharaib, Hawar and the very beginning of the Shu'aiba formations. The quality and diversity of Urgonian outcrops in southeastern France lead that formation to be a good reference proxy of Middle-East reservoirs and to be used for the assessment of sedimentary internal architecture.

A work program focused on the appraisal of geometrical and petrophysical heterogeneity in Urgonian has integrated the acquisition of multi-scales static and dynamic data: outcrop studies (facies, fractures, microfauna ...), well drilling, well tests, aerial photographs, springs and aquifer survey. A huge database has been constituted, it comprises several key sections and more than 60 vertical wells drilled in the Urgonian aquifer, 40 well tests and survey of 13 springs during one year.

Three sequences have been described in the Upper Barremian (Ba3, Ba4 and Ba5) and two sequences in the Lower Aptian (A1 and A2). The existing biostratigraphic chart built for several years by Annie Arnaud-Vanneau for the northern region (*Vercors*) has been improved and completed including the new data from the western zone (*Gard and Ardèche*).

Through a multidisciplinary approach integrating sedimentology, hydrogeology and structural geology,

a new conceptual model for the architecture of the Urgonian deposits on the edge of the platform is proposed. In the study area, three N110° normal faults subdivide the domain into four tilted blocks. The differential subsidence related to this faults activity makes important variations in thickness and facies distribution according to the location in the blocks.

## **Introduction**

Research programs focus on the development of carbonate platforms have been elaborated in order to improve the appraisal of the reservoir properties, and of the understanding of their distribution in such rocks. When the Middle East series were deposited on the southern border of the Tethys Ocean, the Urgonian series was deposited on the northern one of the same Ocean. This Barremo-Aptian formation, outcropping in southeastern France, is usually considered as a very good analog for upper Kharaib, Hawar and lower Shu'aiba reservoir formations of the Middle East.

Several scholars have studied this formation since the middle of the 19<sup>th</sup> century. The northern and the southern border of the Vocontian basin (Vercors, Vaucluse and Provence) have been studied in detail for several decades but the western part (Gard and Ardèche), stayed an area less well known. In addition of sedimentological and structural studies, hydrodynamic data has been integrated to the Urgonian database.

The aim of the study is to discern the factors influencing the repartition of the reservoir properties in such carbonate reservoirs. In order to understand the development of the Urgonian series, its large scale geometry was determined by the detailed sedimentary study of sections and wells, by the analysis of hydraulic data and by the interpretation of structural indications.

## **Location and geological context**

The study area is located on the border of the Vocontian basin, epicontinental sea opened on its East side to the Tethys Ocean. This basin developed during the lower Cretaceous between 25° and 30° North latitude, with a diameter of about 150 kilometers and a depth of few hundreds meters (Fig. 1). It is delimited by two major post-hercynian faults with N/NE-S/SW orientation: the “Cévennes” and the “Nîmes” faults. Once the Urgonian series was deposited, it underwent several tectonic events mainly related to Pyrenean and Alpine orogenies. The late Cretaceous shortening (Maastrichtian) was the first clue of the Pyrenean shortening which occurred during Eocene epoch. After distension event (Oligocene) the Alpine shortening started in Miocene and proceeded during Pliocene. Presently, the Urgonian formation is a huge ground water reservoir exploited for drinking water. Three major rivers: the *Gardon*, the *Cèze* and the *Ardèche*, flowing NW-SE had hollowed out the Urgonian series offering to observation cliffs with thickness up to more than 250 meters.

## **The Urgonian series**

### **The Urgonian series description**

The Urgonian facies was first described by Alcide d'Orbigny (1847) as a lower Cretaceous facies constituted by massive white limestone with rudists. Since then, most parts of the Vocontian basin border, except

the Gard and Ardèche areas, were the subject of many research programs. Only small differences in thickness of the Urgonian series were discovered and no relation between the tectonic and the deposit geometry has been demonstrated. The Urgonian platform is usually considered as a relative calm environment, controlled by a progressive subsidence. One particular environmental change from oxic to disoxic condition has been highlighted: a soft and marly bed on which vegetation often grows. The Urgonian formation can thus be described through two members, the upper one being separated from the lower one by the lower Orbitolinids bed.

Using a modified version of the biostratigraphic chart proposed by Annie Arnaud-Vanneau, Arnaud *et al.* (1998), the description of micro-fauna on thin-sections demonstrates that Urgonian rudists facies starts at the beginning of the upper Barremian and finishes at the end of the lower Bedoulian period (lower Aptian) in Gard and Ardèche sectors. In detail, the lower member of the Urgonian consists of three third order sequences labelled Ba3, Ba4 and Ba5 deposited during the upper Barremian. The lower Orbitolinids bed corresponds to the transgressive system track (TST) of the first sequence of Bedoulian labelled A1. Finally, the upper member of the Urgonian is composed of the highstand system track (HST) of the sequence A1 and of the second sequence of Bedoulian labelled A2.

Contrarily to the Urgonian definition given by Alcide d'Orbigny (1847), the Urgonian series is not only composed of lagoon facies. Different ones from outerself to emersion facies have been observed. If rudists effectively constitute the prevalent macrofauna, however a large range of gastropods, corals, sponges, bryozoans and echinoderms also compose Urgonian. It is known that at times, Urgonian platform environment switch from oligotrophic to mesotrophic leading the usual macrofauna to almost disappearing. The mfs of the upper Barremian first sequence (Ba3) is characterized by a marly limestone with an abundance of annelids corresponding to rich-nutrient environment. Close to the mfs of the sequence A1(lower Aptian), the sedimentation turns from massive rudists limestone (lower member of Urgonian) towards a marly bed full of Orbitolinids (*Palorbitolina lenticularis*) before recovering white massive limestones (upper member of Urgonian) during the HST A1.

#### **A good Middle East reservoir analog (fig. 2)**

The subdivision into three members of the Urgonian series can be compared to the one proposed by Van Buchem *et al.* (2010) for the eastern Arabian plate. In that view, the lower Urgonian corresponds to the upper Kharaib, the lower Orbitolinids bed is the equivalent of the disoxic Hawar and the upper Urgonian corresponds to the lower part of the Shu'aiba.

From a macro facies point of view, there is a good correlation between Urgonian and Middle East series where the same facies arrangement is described. For Van Buchem *et al.*, oligotrophic rudist lagoon facies are the most abundant in the Kharaib and lower Shu'aiba while an Orbitolinids mesotrophic facies, with a large amount of *Palorbitolina lenticularis*, develop in the Hawar member. The annelids-rich marly limestone close to the mfs Ba3 corresponds to the shallow-water marls of the Dense B Middle East formation.

## Sedimentological data and first interpretations

In the study area, 19 sections, dispatched in the whole study area have been sampled, some of them by abseiling, bringing definitive new data. To fill the gap between outcropping sections and to increase the number of sedimentological data, 18 wells were drilled through the Urganian series and dedicated to sedimentology analysis. The sampling strategy was different for sections and wells. Along the sections, samples were collected preferentially around the facies changes and with no regular sample step. On the contrary, with no indication on the facies change along the wells, cuttings were collected regularly every three meters.

### The microscopic study

From each sample and each cutting, a thin section has been built, 2763 in total. On each thin section, the texture, according to the Dunham classification, the micro-fauna and the micro-facies were detailed.

### *The facies model (fig. 3)*

16 different facies have been distinguished considering the texture, the faunistic content and the sedimentary microstructures. Location in the vertical depositional sequence seems not to influence the typology of facies that can be found in sections and wells. Consequently, the facies model does not distinguish between transgressive and highstand system tracks. The concepts of sequential stratigraphy applied to platform carbonates define the limit between the TST and the HST when the platform carbonate is the most flooded. Above this limit, when regression starts, facies are not different from those under the maximum flooding surface. As well, at the top of a sequence, if there isn't any hiatus of sedimentation or erosion, facies are similar around the sequence boundary. However, in the case of Urganian, due to the transgression of the carbonate platform on the continent, environmental changes can be observed. Then, the label of the facies turn from lower case to upper case to report a nutrient or a detritic materials input. That finally permits to distinguish the transgressive period. Moreover, one more facies described as reworked deposit was created to label the transgressive facies in which several fragments of undertow beds can be found.

In order to also highlight the environmental condition changes, like close to the lower orbitolinids bed, letters labeling facies are written in upper case when there is a decrease in the environment oxygenation.(fig. 3)

In order to build a consistent 3D facies model, the 17 facies have been grouped into six facies associations corresponding to six water depth ranges. They are labeled from AF1 to AF6.

### *The biostratigraphic chart (fig. 4)*

In addition to the micro-facies study and in order to distinguish the different sequences composing the Urganian series, a biostratigraphic study was performed on large benthic foraminiferas visible on thin section. Each Orbitolinid and each large Neotrocholine were photographed and then rescaled (x50), to make easier their identification. The association of different species of Orbitolinids and Neotrocholines permits the distinction between the different sequences of the Urganian series:

- TST and HST Ba3: characterized by *Praedictyorbitolina carthusiana*, *Eopalarorbitolina charollaisi* and *Orbitolinopsis debelmasi*. Primitive forms of *Paracoskinolina reicheli* and *Palorbitolina lenticularis* have been

identified.

- TST and HST Ba4: typical species of Ba3 have disappeared. In the same time, most *Paracoskinolina* species (*P. sunnilandensis*, *P. maynci*, *P. reicheli* and *P. hispanica*) appear. They become larger in sequence Ba5.

- TST and HST Ba5: characterized by an abundance of the high conical and the largest forms of *Neotrocholina friburgensis* and by the degree of evolution of *Paracoskinolina*. Moreover, several *Orbitolinopsis* occurred during the HST: *O. buccifer*, *O. pygmea*, *O. kiliani* and *O. briacensis*. Scarcely observed in sequence Ba5, these forms become more evolved and abundant in Ap1.

- TST and HST Ap1: easily identified by the total disappearance of large-sized *Neotrocholina* and by the abundance of *Orbitolinopsis*. *Palorbitolina lenticularis* becomes more and more frequent in the TST of sequence Ap1 up to the MFS (known as “Lower Orbitolina Marl Member”) while the occurrence of a new genus (*Massonnatiella*) help to distinguish the HST.

- TST and HST Ap2: dominated by the abundance of *Palorbitolina lenticularis* with an arenaceous test.

### **1D and Multi-1D interpretation, study at the sections and wells scale**

The succession of the microfacies in addition with the biostratigraphic study, with the observation of diagenetic features and of sedimentological structures, enables the determination of the position of the stratigraphic surfaces (Fig. 5).

Location of the sequence boundary was driven by the following indicators: 1) the thinning-up evolution of parasequences thickness, 2) the evolution of facies toward proximity or confinement, 3) the existence of possible sub-aerial exposure for the evidence of emersion or near emersion diagenetic features. On the opposite, indicators driven the location of the maximum flooding surfaces (mfs) are: 1) the thickening-up evolution of parasequences thickness, 2) the evolution of facies toward distality, 3) The abundance and the diversity of the macro and microfauna, 4) the demise of the reworking facies, 5) the passing from detritic or nutrient-rich media to definite oligotrophic environment.

The stacking patterns issued from this subsequent stratigraphic subdivision on each section and well gave an architectural framework for the Urgonian of the zone. In each of the system track, important variations in thickness and facies proportion are visible. While the thinnest section (only 150 meters for the all Urgonian) is mostly composed of very internal facies (from AF5 to AF6), the thickest ones (more than 400 meters) show a more variable distribution of facies from external to internal (from AF1 to AF5). Such heterogeneity in thickness and facies organization is a very new result, since the thin series are not outcropping and were only assessed thanks to the wells drilled by the project.

### **Hydrological data and interpretations**

In southeastern France, the Urgonian Formation is an important ground water in which fluid flows can be assessed relatively easily. In the zone, 13 springs were selected, on which the temperature and the conductivity of water were monitored during one year. Several tracings were also realized that enable to identify the main flow paths. Using regular surveys of the aquifer, a water table map in the Urgonian has been drawn for the Gard sector. It shows a main flow toward N110° and two N110° oriented hydraulic anomalies which also correspond to two anomalies in transmissivity values. The first one is situated around the Gardon River

and corresponds to a hydraulic barrier. The second one is situated around the Cèze River and corresponds to a hydraulic drain. (fig. 6)

Moreover, about 40 well tests give us values of the permeability at large scale that include both matrix and fracture karstic properties.

## **Structural data and interpretations**

The analysis of structural features was undertaken at different scales. First and at large scale, a study of 175 aerial photographs permitted to identify large scale folds and faults. At small scale, directions and dips of folds, faults, fractures, etc, were measured on the field. Detailed acquisitions of data on tectonic features were made on some microtectonics stations. The study of all those data leads to the individualization of the different well known tectonic stages that occurred after the Urgonian deposit. The tectonic calendar issued from this study underlights the importance of Pyrenean and Alpine orogenies in the structural behavior of the region. However, some tectonic features with a N110° direction, present in the Urgonian series are not related to any post-Urgonian tectonic event already identified. Moreover, brittle tectonic features with normal movement and a N110° direction were observed inside the Urgonian series. Those observations demonstrate that tectonic movements occurred during the Urgonian deposit.

## **Results**

### **Evolution of the Urgonian series according to scale**

At the entire Gard-Ardèche sectors scale, the thickness of the Urgonian series increases toward North-East from while the facies evolves from internal to external towards the same direction. This evolution is consistent with the North-East position of the Vocontian basin. However, this evolution is not progressive. At kilometer scale, the evolution is reversed. The Urgonian thickness increases and the facies become progressively more internal toward the South-West. This surprising evolution is demonstrated on four zones through the studied area. From one to another, variations in thickness and facies are sharp.

### **Deposit organization in tilted blocks**

The locations of the transition between the most reduced series and the thickest correspond to the location of the N110° hydraulic anomalies. Moreover, this direction is consistent with the measurement on the brittle tectonic features measured inside the Urgonian series, and do not correspond to any tectonic phases identified in the tectonic calendar.

All those elements lead to the conclusion that the Urgonian formation was deposited with a fan-shaped deposit geometry in four different blocks separated by normal faults with a N110° direction (fig.7). All the static data, and the geological concepts induced by the combination of sedimentary, structural and hydrological study, had been load in the modeling software gOcad ©. A 3D view of this model is given on fig. 8.

### **Relation between tectonic and deposit geometry**

All this demonstrate how much tectonic influence the sedimentation of the Urgonian series in term of geometry and facies. In the case of Gard and Ardèche sectors, synsedimentary tectonic is the main factor that controls the depositional architecture.

The question on the origin of those tectonic movements along normal faults is still open. They could be related to system in distension, but this interpretation is not really compatible with the development of the Durancian isthmus developed in a shortening context. The other possibility is to consider those tectonic movements as the rearrangement of the upper part of the continental crust induced by the block tilting related to the aperture of the Atlantic Ocean during Jurassic.

### **Reservoir properties repartition**

On the top of the blocks, the Urgonian series is mainly composed of lagoon facies as rudists wackestone in which fractures and karstic features develop easily. From well tests, reservoir permeability has proud to be much higher than in the matrix-related one. On the contrary, at the bottom of the blocks where the Urgonian series is thicker and mostly composed of granular facies, permeability is lower and related to matrix porosity.

### **Conclusion**

The development of the Urgonian in *Gard* and *Ardèche* (southeastern France), considered as a reservoir analog for Kharai b, Hawar and Shu'aiba formations (Middle East), is not controlled by a quiet and regular subsidence of the basin. The tectonic movements during the Barremian-Aptian lead to a fan-shaped geometry of deposit. The sedimentation of limestone has been developed in four tilted blocks separated by N110° normal faults. The fault behavior during Urgonian sedimentation has created a fan-shaped geometry for the deposit. Tectonic movements controlled both thickness and facies repartition, and thus, the reservoir properties spatial distribution in the formation.

Dezooming from Gard-Ardèche to the periphery of the Vocontian basin is possible through the study of other secors of Urgonian formation in southeastern France: Vercors, Vaucluse and Provence. Using the same facies model and the same biostratigraphical chart, several new sections and wells have been studied with a common protocol. Preliminary results demonstrate that the sedimentary model and the concepts issued from Gard-Ardèche sector can be extrapolated in other regions around the Vocontian basin. As well, the correlation pattern based on biostratigraphy as been confirmed by geochemical analyses ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  and phosphorus content) performed on six key sections in the whole region.

### **References:**

Arnaud H., Arnaud-Vanneau A., Alétru M.-C., Adatte T., Argot M., Delanoy G., Thieuloy J.-P., Vermeulen J., Virgone A., Viroulet B. & Wermeille S. (1998).- *Répartition stratigraphique des orbitolinidés de la plate-forme subalpine et jurassienne (SE de la France)*. *Géologie Alpine* v. 74, 3-89.

Sibuet J.C., Srivastava S.P., Spakman W. (2004) Pyrenean orogeny and plate kinematics, *J. Geophys. Res.*, 109.



Srivastava S.P., Sibuet J.C., Cande S., Roest W.R., Reid I.R. (2000), Magnetic evidence for slow seafloor spreading during the formation of the Newfoundland and Iberian margins, *Earth and Planetary Science Letters*, Amsterdam, vol.182, n°1, p. 61-76.

Stampfli, G.M., Borel, G.D. (2004) The TRANSMED transects in space and time: constraints on the paleotectonic evolution of the Mediterranean domain. In: Cavazza, W., Roure, F., Spakman, W., Stampfli, G.M., Ziegler, P. (Eds.), *The TRANSMED Atlas: the Mediterranean Region from Crust to Mantle*. Springer, Berlin, pp. 53–80.

Steuber T., Rauch M., Masse J.P., Graaf J., Molkoc M. (2005) Low-latitude seasonability of Cretaceous temperatures in warm and cold episodes. *Nature*, Volume 437, Issue 7063, 1341-1344.

van Buchem, F.S.P., Al-Husseini, M.I., Maurer, F., Droste, H.J. and Yose, L.A. (2010) Sequence-stratigraphic synthesis of the Barremian - Aptian of the eastern Arabian Plate and implications for the petroleum habitat. In: *Barremian – Aptian Stratigraphy and Hydrocarbon Habitat of the Eastern Arabian Plate* (Eds F.S.P. van Buchem, M.I. Al-Husseini, F. Maurer and H.J. Droste), *GeoArabia Special Publication 4*, v.1, 9-48. Gulf PetroLink, Manama, Bahrain.

Warrlich G., Anthor J., Abu-Shiekah I., Kharusi A., Kindy M., Garimella S. (2011), Adjusting modeling methodologies to decision requirements, reservoir properties and recovery mechanism – Examples from the Shuaiba in Oman. SPE, SPE-148265, p.19.

## Figures:

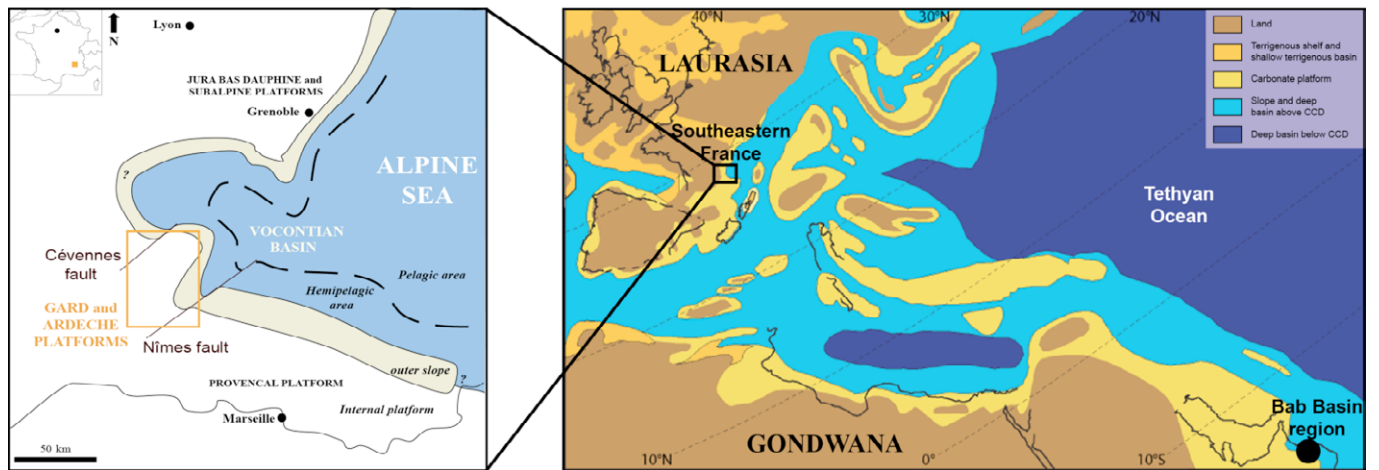
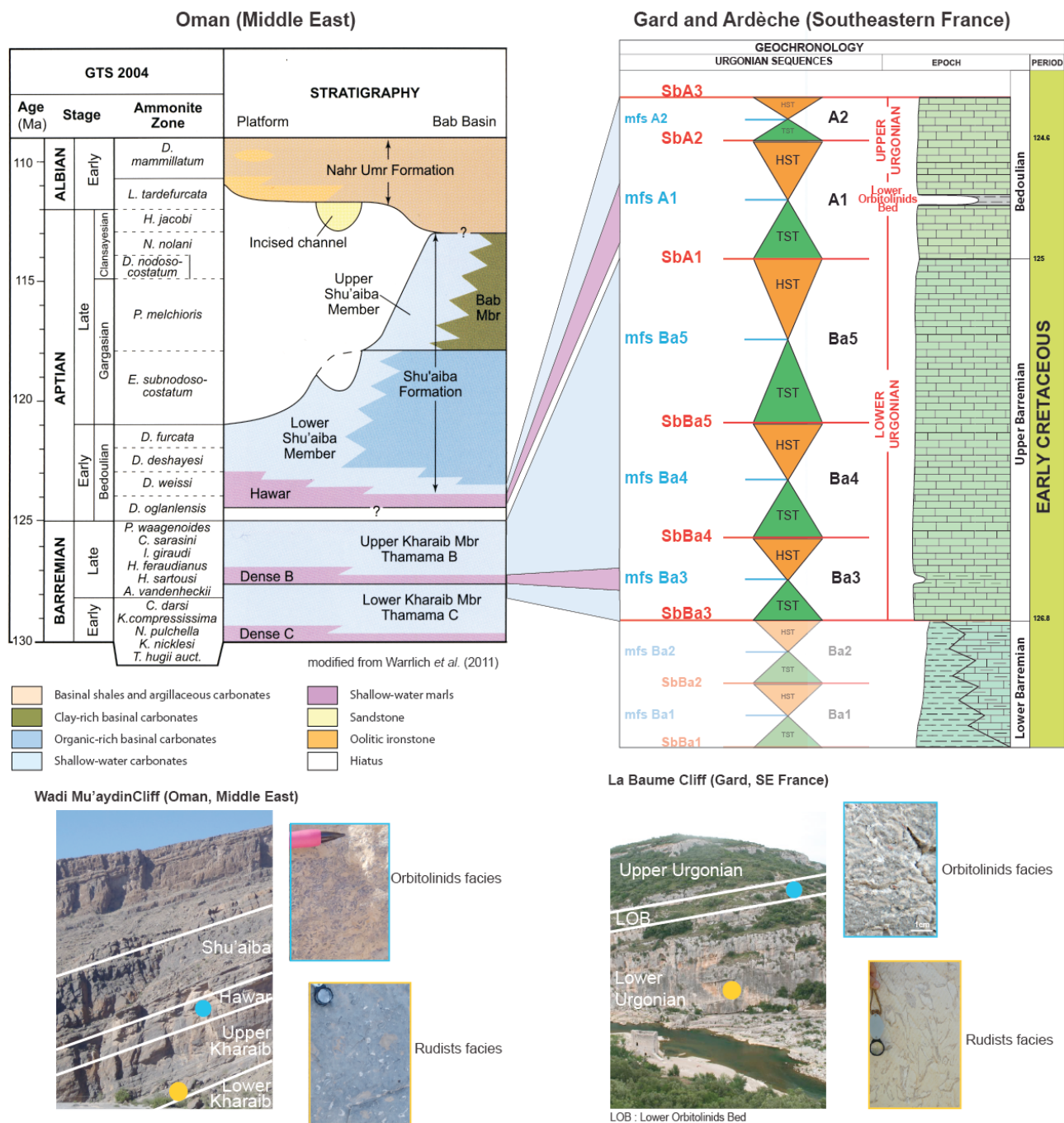


Figure 1: Paleogeography and location of the Gard and Ardèche Platforms in southeastern France in lower Aptian period, modified from H. Arnaud (1980) and Steuber et al. (2005)



**Figure 2: Stratigraphical and facies correspondance between the southeastern France Urganian series and the Middle East KharaiB, Hawar and Shu'aiba members.**

Facies Association Model

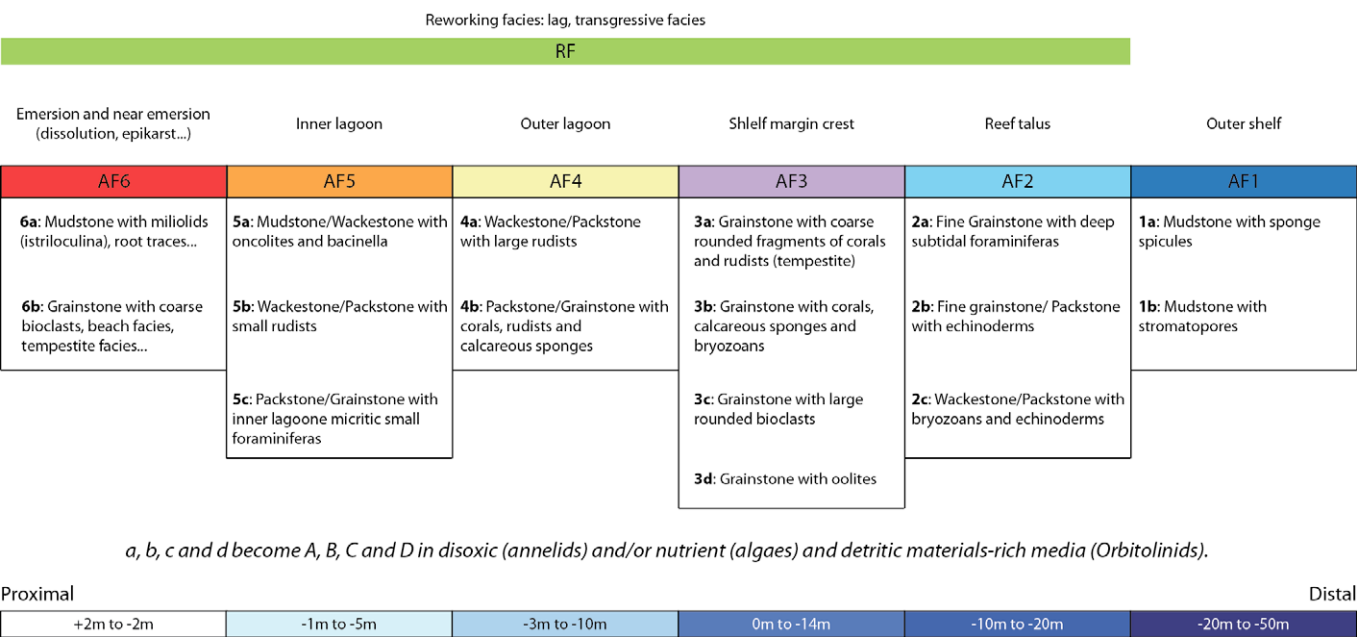


Figure 3: Microfacies Model of the Urgonian series in southeastern France

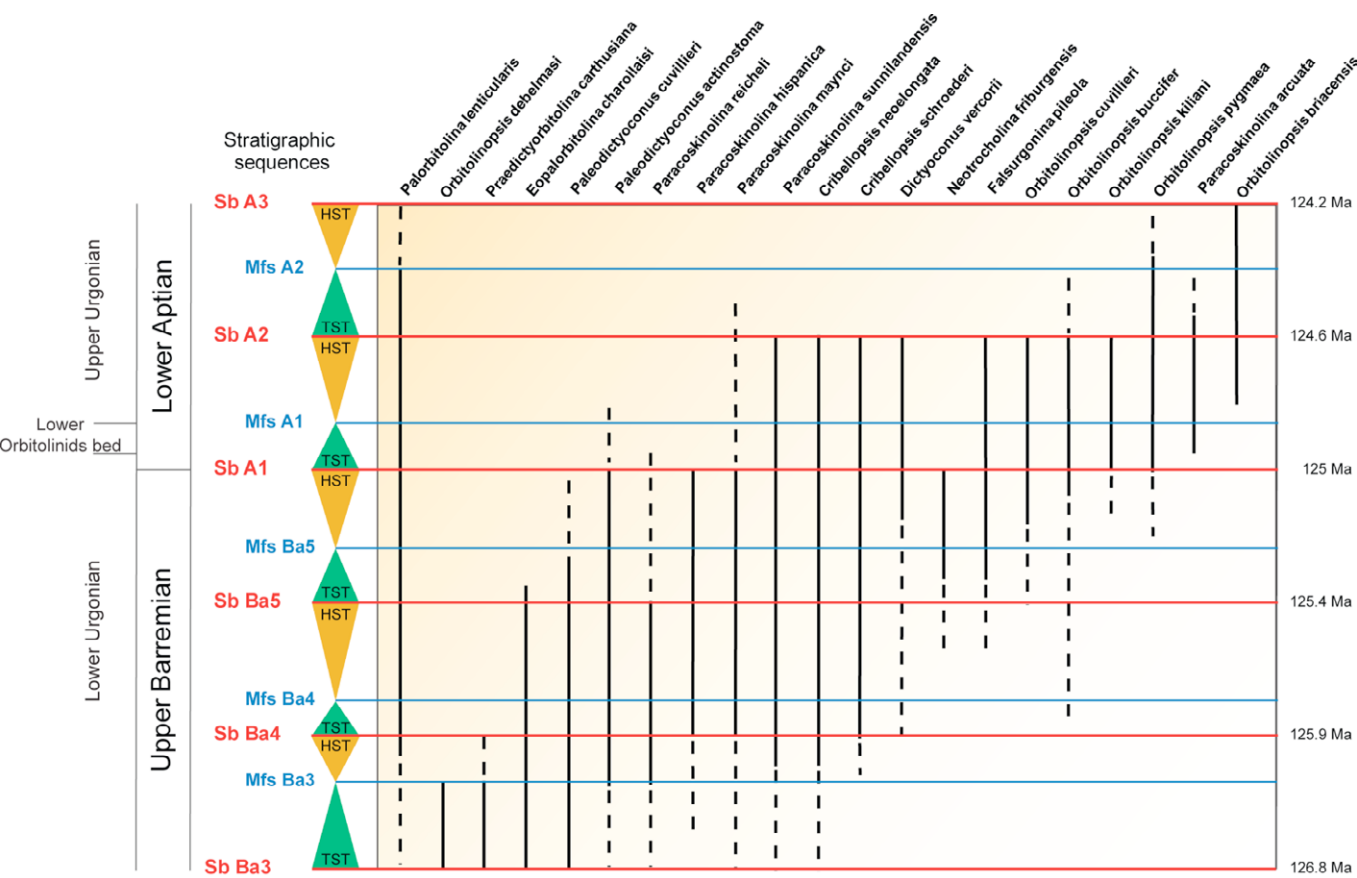


Figure 4: Biostratigraphic chart of the Urgonian series in Gard and Ardèche (Southeastern France)

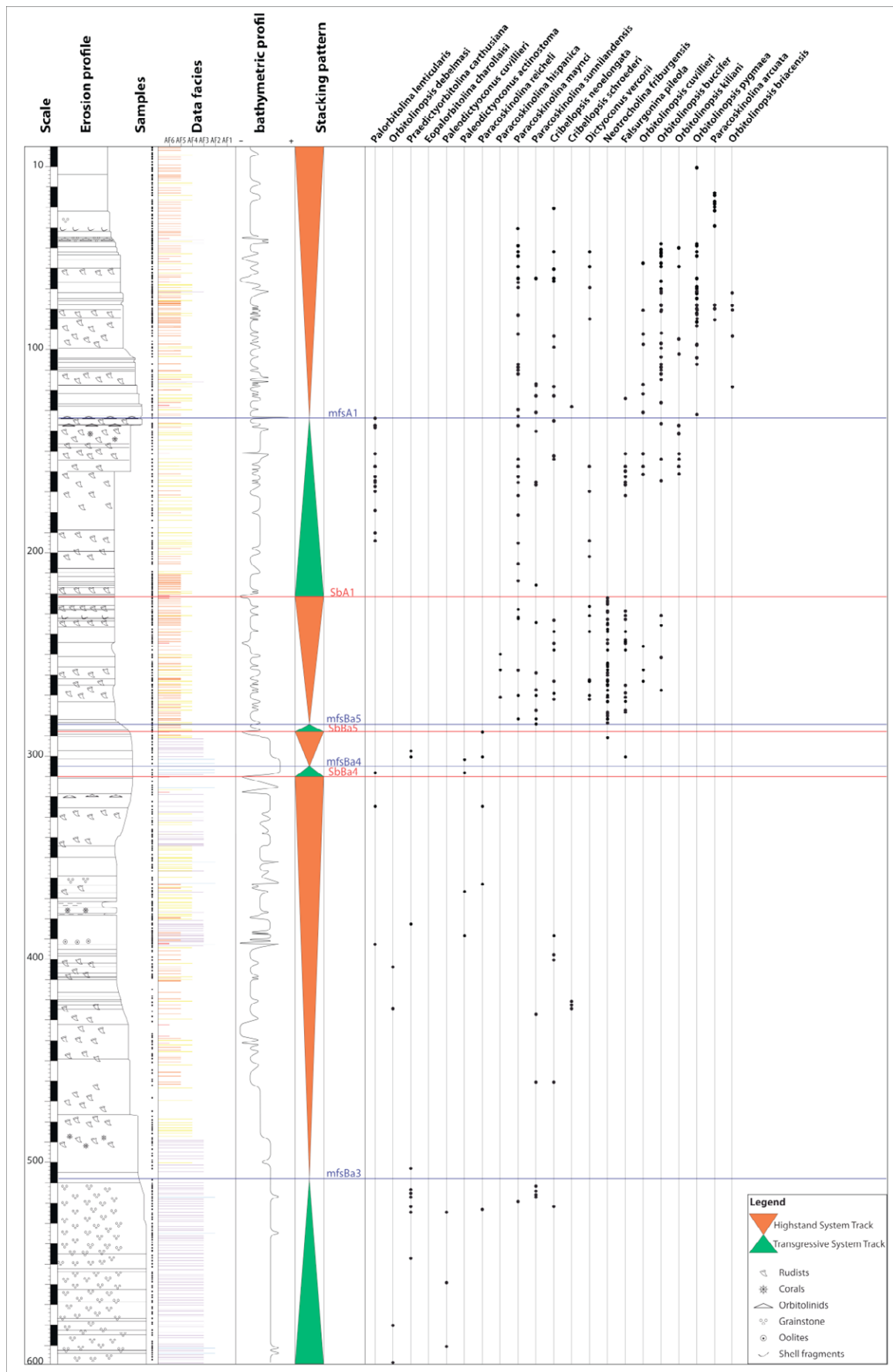
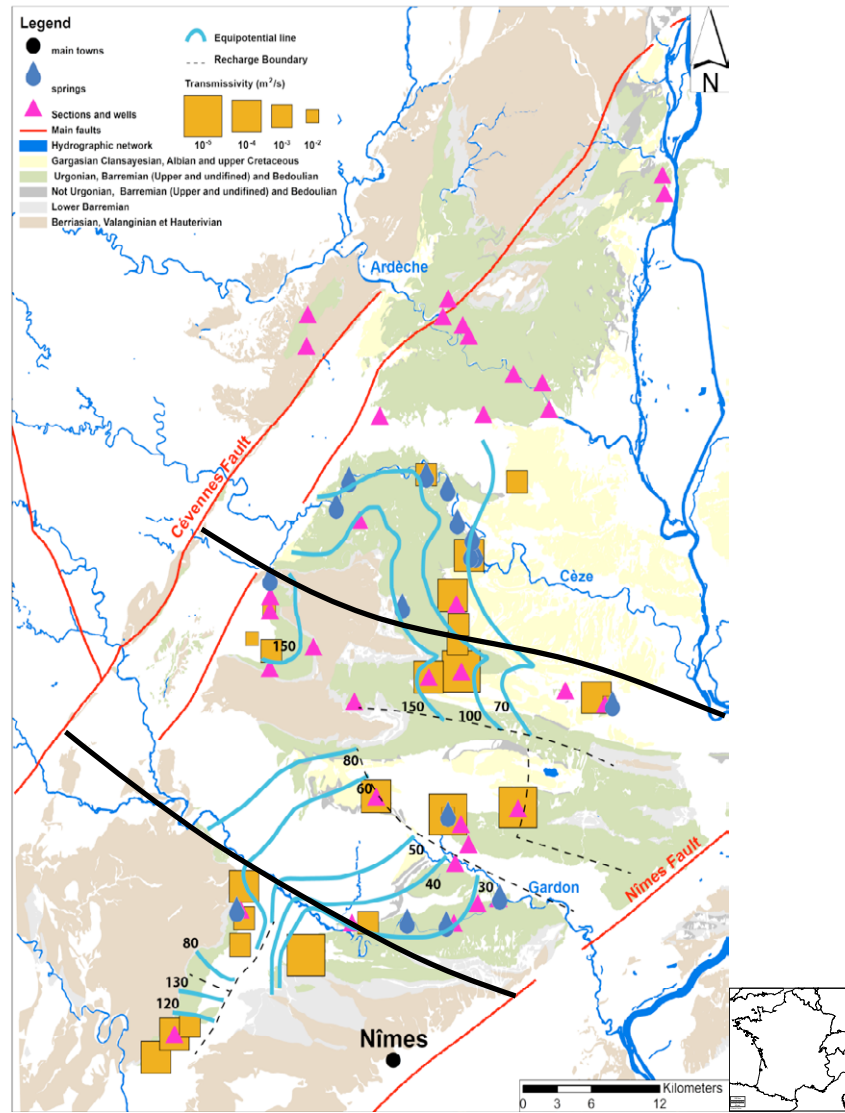
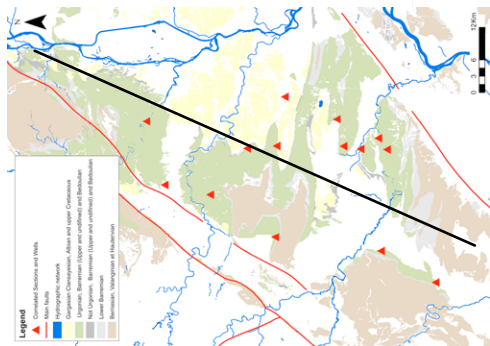


Figure 5: Example of a studied section log: The Gorges de l'Ardèche composite section, Ardèche (SE France)



**Figure 6: Water table map and transmissivity distribution in the Gard and Ardèche sectors (SE France), from internal TOTAL data.**  
**Black lines represent the location of the hydraulic anomalies.**





CXXXVII



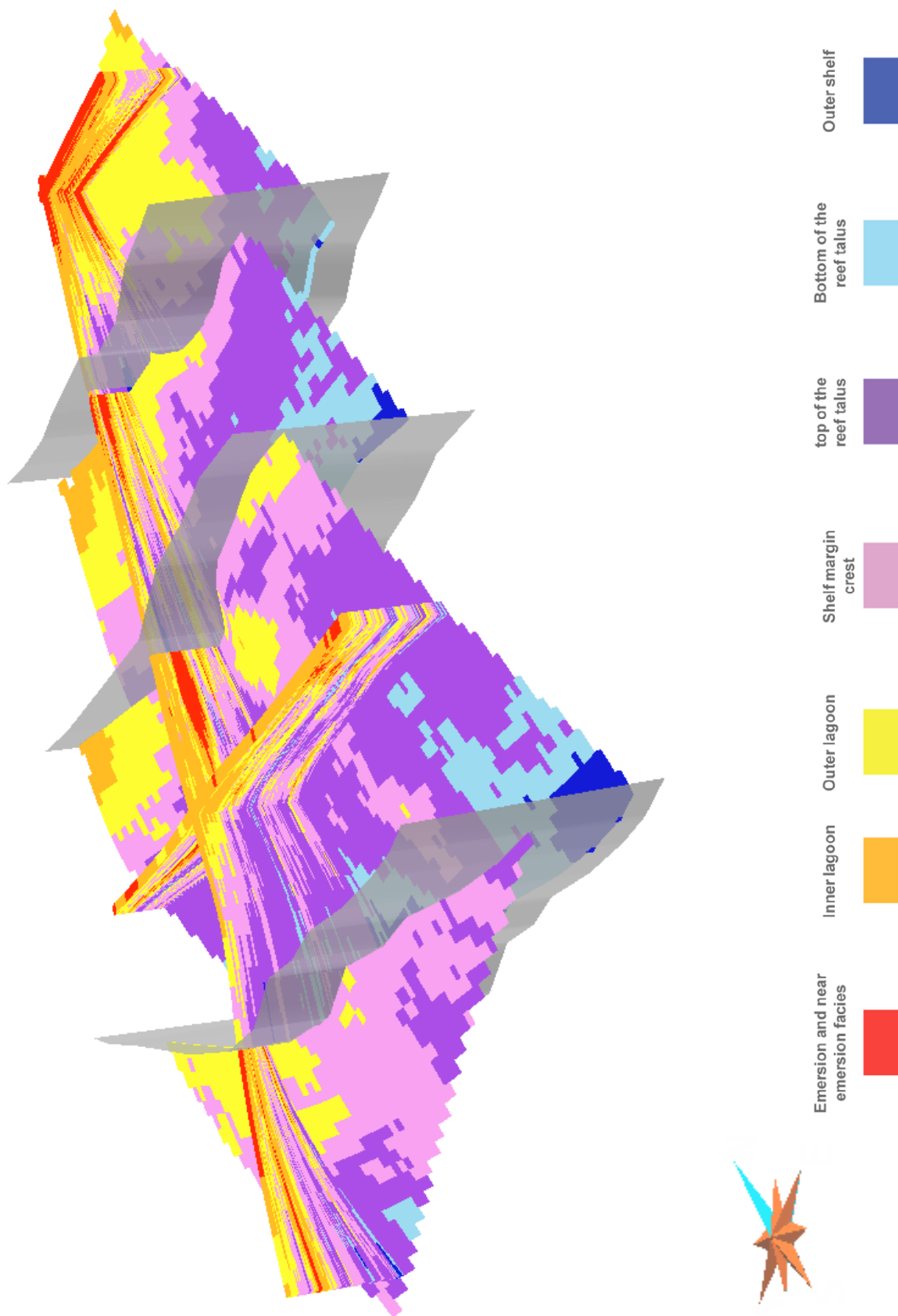


Figure 8: 3D view of the Gard and Ardèche facies model (SE France).

### **3.8 IAS 2012, METTING OF SEDIMENTOLOGISTS, SCHLADMING, AUSTRIA**

#### **Correlation of Urgonian limestone in SE France: New geochemical constrains**

F. Bastide<sup>1, 2&4</sup>, Karl B. Föllmi<sup>2</sup>, Thierry Adatte<sup>2</sup>, Annie Arnaud-Vanneau<sup>3</sup>, Gérard Massonnat<sup>4</sup>, Thierry Dumont<sup>1</sup>, Aurélien Virgone<sup>4</sup>, Hubert Arnaud<sup>3</sup>, Cécile Pabian-Goyheneche<sup>4</sup>

1: ISTerre, Université Joseph Fourier, 38041 Grenoble, France (Thierry.Dumont@ujf-grenoble.fr),

2: Institut de Géologie et Paléontologie, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse, (karl.foellmi@unil.ch, thierry.adatte@unil.ch)

3: Association Dolomieu, 38031 Grenoble, France (annie.arnaud@orange.fr, hubert\_arnaud@orange.fr)

4: TOTAL S.A., 64000 Pau, France (fanny.bastide@total.com, gerard.massonnat@total.com, aurelien.virgone@total.com, cecile.pabian-goyheneche@total.com)

Urgonian platform carbonates are widespread in southeastern France. They were deposited along the northern Tethyan margin and bordered the Vocontian basin. They are predominantly composed of rudistic wackestone and bioclastic/ooid grainstone and often crop out in the form of massive cliffs. The geochemical study presented here is a part of a PhD on the understanding of the development of the Urgonian platform during the late Barremian and the early Aptian in southeastern France.

54 sections and wells have been studied to determine the stratigraphic framework using the facies succession, sedimentological structures and orbitolinid biostratigraphy. Among those 54 sections and wells, six key sections have been chosen for geochemical analyses in each main sector of southeastern France: the Candelle section in Provence, the Fontaine de Vaucluse section in Vaucluse, the Nant section in Vercors, the Pont de Laval and the Ardèche Gorges sections in Ardèche and the Angostrines section in Gard. On those six sections, both whole-rock  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ , as well as the phosphorus concentration have been analyzed. The selected sections represent 900 samples and 1967 meters.

We present here the results of the Candelle section, in which the phosphorus and the microfossil content highlight two very different environments:

- a first one with relative important phosphorus concentrations indicating a mesotrophic environment and corresponding to the late Hauterivian

- and a second one with very low phosphorus concentrations pointing to an oligotrophic environment and corresponding to the late Barremian in which the Urgonian series is developed.

In terms of biostratigraphy, the typical Hauterivian fauna (*Cayeuxia anae*, *Histerolina scithiolina*, *Decussoloculina*, small *Trocholina*...) pass to the Urgonian fauna, i.e., orbitolinid assemblages known in the Urgonian series of the whole southeastern France (*Paracoskinolina maynci*, *sunnilandensis*, *Palorbitolina lenticularis*, *Paleodictyoconus actinostoma*...) and corresponding the base of the upper Urgonian.

As in the Eclepens section (Godet et al., 2010), the passage from the late Hauterivian to the late Barremian is characterized by strong variations in the  $\delta^{13}\text{C}$  record corresponding to a strongly condensed and partly hiatal lower Barremian interval at Eclepens. The Candelle section shows a comparable succession in that it starts with marly limestone of late Hauterivian age, a part of the late Hauterivian and of the early Barremian is probably missing, and finally the most important part of the Candelle section corresponds to the upper Barremian rudistic wackestone of the Urgonian series.

In addition of local interpretations related to each section itself, the geochemical analyses have been used in a regional purpose to correlate between the sections. Indeed, the  $\delta^{13}\text{C}$  and the phosphorus concentration curves of each section can be compared to another. Some general trends have been recognized allowing the correlation of the Urgonian series from the base of the late Barremian to the early Aptian for all sections studied in southeastern France.

GODET, A., FOLLM, K.B., BODIN, S., DE KAENEL, E., MATERA, V. and ADATTE, T. 2010. Stratigraphic, sedimentological and palaeoenvironmental constraints on the rise of the Urgonian platform in the Western Swiss Jura. *Sedimentology*, 57, 4, 1088-1126.







## Résumé :

Au Crétacé inférieur, l'intense activité magmatique due à la dislocation du super-continent Pangée influence fortement les conditions environnementales globales. Au Barrémien terminal et Aptien basal, période géologique dont fait l'objet cette étude, le bassin Vocontien, puis Bédoulien, recouvre le Sud-Est de la France, sous un climat chaud et humide. Sur les bordures de ces bassins, des plateformes carbonatées se mettent en place. Les sédiments qui se déposent sur ces plateformes sont à l'origine de la formation urgonienne.

Afin d'étudier cette formation, une charte biostratigraphique, principalement basée sur les Orbitolinidés, et un modèle de faciès ont été développés. Les assemblages faunistiques, la succession des faciès, les observations de terrain ainsi que l'étude de signaux géochimiques ont permis le découpage séquentiel de la série urgonienne le long de 54 coupes et puis, répartis sur l'ensemble du Sud-Est de la France.

Les corrélations induites par cette étude stratigraphique ont mis en évidence d'importantes variations d'épaisseur et d'environnements de dépôt au sein même de la plateforme urgonienne. Ces variations sont expliquées par le jeu de failles syn-sédimentaires qui ont compartimentées la plateforme urgonienne en blocs. Sur la bordure sud du bassin Vocontien, ces failles d'orientation N30° et N110° délimitent six blocs basculés. Au sommet du Barrémien terminal, la subsidence des blocs situés le plus au sud s'amplifie jusqu'à provoquer l'ouverture du bassin de la Bédoule au sud du secteur d'étude.

Cette théorie d'évolution a ensuite été testée par l'élaboration d'un modèle numérique en trois dimensions de l'Urgonien du Sud-Est de la France. Sa cohérence avec les données acquises tout au long de cette étude d'une part, et sa cohérence géométrique d'autre part, valide les théories avancées.

Des analogues de l'Urgonien sont répartis dans le monde entier et notamment au Moyen-Orient où ils représentent d'importants réservoirs pétroliers. Être capable de caractériser les facteurs ayant influencé l'architecture de l'Urgonien du Sud-Est de la France permet par la suite une meilleure exploitation de ses ressources énergétiques.

## Abstract:

During the Early Cretaceous epoch, intensive magmatic activity due to the dislocation of the super-continent Pangaea, highly influenced global environmental conditions, which were characterized by a warm and generally humid climate. In this context, carbonate platforms were important in tropical and subtropical shallow-water regions, and especially during the late Barremian and early Aptian, platform carbonates of so-called Urgonian affinity are widespread. In southeastern France, the Urgonian platform was part of the northern Tethyan margin and bordered the Vocontian and the Bedoulian basins.

The goal of this thesis was the systematic study of the Urgonian Formation in this region, and in order to achieve this goal, a biostratigraphic chart and a facies model were developed. The faunistic assemblages, the facies succession, the field observations and the study of geochemical signals lead to a sequential subdivision of the Urgonian series along 54 sections and wells allocated in five different regions in southeastern France (Gard, Ardèche, Vercors, Vaucluse and Provence).

Correlations from this stratigraphic study highlight important variations in thickness and depositional environments of the Urgonian series. These variations are explained by relative movements induced by syn-sedimentary faults, which divided the Urgonian platforms into blocks. On the southern border of the Vocontian basin, these faults, oriented N30° and N110°, delineate six tilted blocks. At the top of the upper Barremian carbonates, subsidence of the two southern blocks accelerated leading to the opening of the Bedoulian basin.

The reconstruction of the sequence-stratigraphic and paleoenvironmental evolution of the Urgonian platforms was then tested by the construction of a 3D numerical model of the Urgonian formation of southeastern France. Firstly, its consistency with the data collected during this study, and secondly, its geometrical coherence validate the proposed theory.

Urgonian analogs exist all over the world and particularly in Middle East where they constitute important oil reservoirs. The exact reconstruction of the major factors, which influenced the architecture of these formations, will allow for a better exploitation of these energy resources.